

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**UNIDAD DE POSGRADO**

**Simulación de la hidrodinámica en la Bahía de  
Paracas, Pisco-Perú; utilizando forzantes físicos**

**TESIS**

para optar el Grado Académico de Magíster en Física con mención en  
Geofísica

**AUTOR**

Jorge Martín Quispe Sánchez

**ASESOR**

Isabel Ramírez Aguilar

**Lima – Perú**

**2007**

# Dedicatoria

*A mis padres.....*

*A mi familia.....*

# Agradecimientos

En estos párrafos deseo señalar que ha llegado el momento de comenzar a recordar todos los buenos momentos de estos años y a la gente que ha logrado que fuesen así, y que también han estado ahí apoyándome cuando no eran tan buenos. A todos me gustaría darles las gracias y entre ellos, me gustaría nombrar a algunos.

Quisiera expresar mi agradecimiento a la Dra. Isabel Ramírez Aguilar por haber dirigido este trabajo y por haberme dado la oportunidad de hacer una estancia corta en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C México.

Mi agradecimiento al Jurado Examinador integrado por el Dr. Joel Rojas Acuña, Dr. Jorge Bravo Cabrejos, Dr. Adolfo Posadas, Dra. Isabel Ramírez Aguilar y el Mg. Víctor Yzocupe Corahua, por su disposición a revisar la tesis. Sus correcciones y sugerencias contribuyeron con el trabajo, los mismos que integraron Jurado para la sustentación de la tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C México, por haber colaborado con los equipos de medición oceanográfica para la campaña de mediciones en la recolección de datos del área de estudio.

Al Dr. Jorg Imberger y Dra. Chris Dallimore del Centre for Water Research de la Universidad de Western Australia, por permitir el uso del modelo ELCOM en este trabajo para hacer la aplicación en la Bahía de Paracas en la que se basa gran parte de esta tesis.

El agradecimiento a todas las personas que forman la estructura administrativa de la Facultad de Ciencias Físicas y de la Unidad de Postgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el soporte brindado durante mi carrera tanto en el pregrado como en el postgrado.

Al Ing. Octavio Morón por admitirme en su línea de investigación en un momento en el que parecía que se me cerraban todas las puertas, y por apoyarme más tarde en el proyecto de Investigación sobre Hidrodinámica de áreas costeras y puertos del mar peruano, caracterización y modelado numérico en el Instituto del Mar del Perú.

Al Lic. Roberto Flores por compartir e interactuar la visión física de los modelos numéricos, por su amistad, así como por la confianza y apoyo incondicional mostrado durante estos años.

A mis colegas de trabajo e investigación por su apoyo y colaboración, José Tenorio Calderón, Luís Vásquez Espinoza, Noel Domínguez Obregón y Marcelo Crispín Carpio.

Al Dr. Leonidas Ocola, maestro en los cursos de la maestría, de quien he aprendido tanto de sus enseñanzas y exigencias que impartió.

Me gustaría incluir aquí también a todas las personas que he encontrado en mi estancia en Cicese-Ensenada B.C México. A todas, gracias.

Por acercarme al mar desde pequeño, por enseñarme cosas que no van a aparecer nunca publicadas en una revista científica, por ponerme los pies en la tierra y por su día a día incondicional, quiero darle las gracias a mis padres y a mi familia que hicieron un esfuerzo en apoyarme en todo.

Me gustaría hacer también mención especial a todas aquellas instituciones que han apoyado mi labor durante estos años: al Instituto del Mar del Perú y a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.



## CONTENIDO

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1. <i>Antecedentes</i> .....	18
1.2. <i>Objetivos</i> .....	21
1.3. <i>Área de Estudio</i> .....	22
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>25</b>
2.1. <i>Introducción</i> .....	25
2.2. <i>Hidrodinámica de Sistemas Semicerrados</i> .....	27
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>30</b>
3.1. <i>Las Mediciones</i> .....	30
3.1.1. <i>Instrumentación</i> .....	31
3.1.2. <i>Nivel del Mar</i> .....	37
3.1.3. <i>Meteorología</i> .....	37
3.2. <i>Procesamiento de datos</i> .....	38
3.2.1. <i>Hidrografía</i> .....	38
3.2.2. <i>Corrientes</i> .....	39
3.2.3. <i>Cadena de Termistores</i> .....	40
3.3. <i>Simulación Numérica</i> .....	40
3.3.1. <i>Descripción del Modelo</i> .....	40
3.3.2. <i>Datos de entrada al modelo</i> .....	43
3.3.2.1. <i>Batimetría</i> .....	43
3.3.2.2. <i>Forzantes Físicos</i> .....	48
<i>Marea</i> .....	48
<i>Calentamiento Superficial</i> .....	49
<i>Viento</i> .....	49
3.3.2.3. <i>Condiciones iniciales</i> .....	50
3.3.2.4. <i>Condiciones iniciales y de frontera</i> .....	52
3.3.2.5. <i>Paso de tiempo</i> .....	52
3.3.2.6. <i>Salidas del modelo</i> .....	54

## CONTENIDO (continuación)

	<b>Página</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>55</b>
4.1. <i>Secciones Verticales</i> .....	55
4.1.1 Temperatura.....	57
4.2. <i>Secciones Horizontales</i> .....	<b>67</b>
4.2.1. Velocidad.....	<b>67</b>
4.2.2. Temperatura.....	<b>89</b>
4.2.3. Salinidad.....	<b>103</b>
4.2.4. Densidad.....	<b>117</b>
4.3. <i>Validación</i> .....	<b>132</b>
 <b>5. CONCLUSIONES.....</b>	 <b>140</b>
<i>Referencias Bibliográficas</i> .....	142
 <b>APENDICES</b>	
<i>Anexo 1: Método Numérico</i> .....	147
<i>Anexo 2: Condiciones Iniciales y de Frontera</i> .....	151

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla		Página
I	Especificaciones técnicas del GPSMAP 185 Sounder.	32
II	Especificaciones técnicas de los Sensores del CTD Seabird SBE 19 plus.	33
III	Especificaciones técnicas del ADCP Workhorse Sentinel del RDInstruments.	35
IV	Especificaciones técnicas de los Termistores Marca ONSET.	37
V	Especificaciones técnicas de la Estación Meteorológica DAVIS.	38
VI	Características de los grupos de las variables obtenidos durante las simulaciones	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Localización de la Bahía de Paracas.....	24
3.1	Estaciones de muestreo de la campaña de mediciones Bahía de Paracas.....	31
3.2	Recorrido para obtener la batimetría de la Bahía de Paracas.....	45
3.3	Batimetría de la Bahía de Paracas.....	46
3.4	Series de tiempo del nivel del mar con que se forzó el modelo mayo 2005.....	49
3.5	Serie de forzantes meteorológicos utilizados en la simulación mayo .....	50
3.6	Condiciones iniciales durante la simulación mayo 2005.....	51
4.1	Localización de la sección vertical.....	58
4.2	Distribución vertical de la temperatura entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	61
4.3	Distribución vertical de la temperatura entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	62
4.4	Distribución vertical de la temperatura entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	63
4.5	Distribución vertical de la temperatura entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	64
4.6	Distribución vertical de la temperatura entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	65
4.7	Distribución vertical de la temperatura entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	66
4.8	Distribución de la velocidad y temperatura superficial entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	71
4.9	Distribución de la velocidad y temperatura superficial entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	72
4.10	Distribución de la velocidad y temperatura superficial entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005.....	73
4.11	Distribución de la velocidad y temperatura superficial entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00:00 15-May-2005 .....	74
4.12	Distribución de la velocidad y temperatura superficial entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005.....	75
4.13	Distribución de la velocidad y temperatura superficial entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	76
4.14	Distribución de la velocidad y temperatura capa de fondo entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	77

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
4.15	Distribución de la velocidad y temperatura capa de fondo entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	78
4.16	Distribución de la velocidad y temperatura capa de fondo entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	79
4.17	Distribución de la velocidad y temperatura capa de fondo entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	80
4.18	Distribución de la velocidad y temperatura capa de fondo entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	81
4.19	Distribución de la velocidad y temperatura capa de fondo entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	82
4.20	Velocidades y distribución horizontal de la rapidez promedio vertical entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 ....	83
4.21	Velocidades y distribución horizontal de la rapidez promedio vertical entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 ....	84
4.22	Velocidades y distribución horizontal de la rapidez promedio vertical entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 ....	85
4.23	Velocidades y distribución horizontal de la rapidez promedio vertical entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 ....	86
4.24	Velocidades y distribución horizontal de la rapidez promedio vertical entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 ....	87
4.25	Velocidades y distribución horizontal de la rapidez promedio vertical entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 ....	88
4.26	Distribución horizontal de la temperatura capa superficial entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	91
4.27	Distribución horizontal de la temperatura capa superficial entre las 17:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	92
4.28	Distribución horizontal de la temperatura capa superficial entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	93
4.29	Distribución horizontal de la temperatura capa superficial entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	94
4.30	Distribución horizontal de la temperatura capa superficial entre las 06:00 16-May-2005 a las 09:00 16-May-2005 .....	95
4.31	Distribución horizontal de la temperatura capa superficial entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	96
4.32	Distribución horizontal de la temperatura capa de fondo entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	97
4.33	Distribución horizontal de la temperatura capa de fondo entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	98
4.34	Distribución horizontal de la temperatura capa de fondo entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	99

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
4.35	Distribución horizontal de la temperatura capa de fondo entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	100
4.36	Distribución horizontal de la temperatura capa de fondo entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	101
4.37	Distribución horizontal de la temperatura capa de fondo entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	102
4.38	Distribución horizontal de la salinidad capa superficial entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	105
4.39	Distribución horizontal de la salinidad capa superficial entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	106
4.40	Distribución horizontal de la salinidad capa superficial entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	107
4.41	Distribución horizontal de la salinidad capa superficial entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	108
4.42	Distribución horizontal de la salinidad capa superficial entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	109
4.43	Distribución horizontal de la salinidad capa superficial entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	110
4.44	Distribución horizontal de la salinidad capa de fondo entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	111
4.45	Distribución horizontal de la salinidad capa de fondo entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	112
4.46	Distribución horizontal de la salinidad capa de fondo entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	113
4.47	Distribución horizontal de la salinidad capa de fondo entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	114
4.48	Distribución horizontal de la salinidad capa de fondo entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	115
4.49	Distribución horizontal de la salinidad capa de fondo entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	116
4.50	Distribución horizontal de la densidad capa superficial entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	119
4.51	Distribución horizontal de la densidad capa superficial entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	120
4.52	Distribución horizontal de la densidad capa superficial entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	121
4.53	Distribución horizontal de la densidad capa superficial entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	122

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

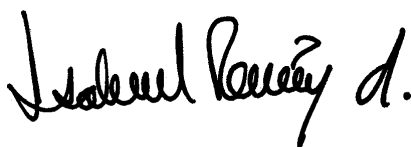
Figura		Página
4.54	Distribución horizontal de la densidad capa superficial entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	123
4.55	Distribución horizontal de la densidad capa superficial entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	124
4.56	Distribución horizontal de la densidad capa de fondo entre las 06:00 14-May-2005 a las 13:00 14-May-2005 .....	125
4.57	Distribución horizontal de la densidad capa de fondo entre las 17:00 14-May-2005 a las 23:00 14-May-2005 .....	126
4.58	Distribución horizontal de la densidad capa de fondo entre las 06:00 15-May-2005 a las 13:00 15-May-2005 .....	127
4.59	Distribución horizontal de la densidad capa de fondo entre las 17:00 15-May-2005 a las 23:00 15-May-2005 .....	128
4.60	Distribución horizontal de la densidad capa de fondo entre las 06:00 16-May-2005 a las 13:00 16-May-2005 .....	129
4.61	Distribución horizontal de la densidad capa de fondo entre las 17:00 16-May-2005 a las 23:00 16-May-2005 .....	131
4.62	Distribución vertical de parámetros oceanográficos frente a Punta Pejerrey. Estaciones 36,37, 38, 39 y 40	135
4.63	Simulación numérica en la boca de conexión	135
4.64	Distribución vertical de parámetros oceanográficos frente a Paracas. Estaciones 12, 13 y 14	136
4.65	Simulación numérica en el medio de la Bahía.	136
4.66	Velocidades de las corrientes a diferentes profundidades (2, 4, 6, y 8m), día 14/05/2005	137
4.67	Velocidad de las corrientes a diferentes profundidades (2, 4, 6 y 8 m), día 15/05/2005	138
4.68	Comparación de la velocidad de la corriente a dos metros de profundidad con la simulada promediada en la vertical para el día 15/05/2005	139
4.69	Velocidad de la corriente marina a) Medida con un correntómetro Anderaa para 2 m de profundidad. b) climatología de las corrientes para un viento constante de 5cm/s	139
4.70	Simulación numérica con forzante de viento. a) Todo el dominio. b) Simulación numérica haciendo un Zoom para la Bahía (Modelo Pom)	140
4.71	Simulación numérica con forzante de viento y marea Simultáneamente(Modelo Elcom)	140

**RESUMEN** de la tesis de **Jorge Martín Quispe Sánchez**, presentado como requisito para la obtención del grado de MAGISTER EN FÍSICA, Mención Geofísica.

Lima, Ciudad Universitaria, Perú. Diciembre 2006.

**SIMULACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA EN LA BAHÍA DE PARACAS, PISCO-Perú, UTILIZANDO FORZANTES FÍSICOS.**

Resumen aprobado por:



---

Dr. Isabel Ramírez Aguilar  
Director-Asesor de Tesis Externo

---

El presente trabajo tiene por objetivo determinar la hidrodinámica de la Bahía de Paracas mediante mediciones de campo y simulaciones numéricas. Se analizó una serie de datos medidos durante la campaña de mediciones oceanográficas; los datos consistieron en perfiles de temperatura, salinidad y velocidad de las corrientes, y fueron complementados con datos meteorológicos y de nivel del mar. Las simulaciones se realizaron con el modelo computacional (ELCOM 3D) (Estuary and Lake Computer Model). El Modelo *ELCOM* utiliza principios hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua semicerrados y estratificados sometidos a forzamientos físicos externos. Se realizaron campañas de mediciones para obtener una batimetría detallada de la Bahía (mayo 2005 y abril 2006) y datos hidrográficos para preparar el pre y postprocesamiento del modelo numérico. El modelo resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y el transporte de escalares para un flujo no permanente, no



viscoso e incompresible utilizando la aproximación hidrostática y de Boussinesq.

El modelo se aplicó sobre una malla cartesiana rectangular con  $dx=dy=100$  m,  $dz=2$ m, con un paso de tiempo  $dt=10$  s. y fue forzado con series de tiempo de marea, radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y humedad relativa. Se utilizó diferentes condiciones iniciales y de frontera en el modelo para analizar la capacidad de reproducir la dinámica física del sistema. Las simulaciones realizadas incluyen respuestas a flujos inducidos por cambios en la pendiente (respuestas barotrópicas), flujos inducidos por cambios en la densidad no homogéneos (respuestas baroclínicas), efectos rotacionales, esfuerzos del viento, forzamiento de marea, intercambio térmico superficial, y por transporte de sal y calor. El modelo simuló sólo la distribución de temperatura y corrientes en la Bahía, y se validó con datos de campo. Los resultados de las simulaciones muestran que la circulación superficial y la mezcla vertical responden al esfuerzo del viento para velocidades del viento superior a 4 m/s; durante la bajamar la dirección de la corriente de fondo fue hacia adentro de la Bahía por la boca de conexión y viceversa durante la pleamar; las corrientes superficiales siguieron la dirección del viento para velocidades mayores a 4 m/s. La estructura vertical de temperatura presentó gradientes pronunciados por lo que la estratificación observada se debe a la temperatura; esto se debe a que debido a la advección del sistema las temperaturas bajas entran por el fondo y parte Este, e inundan la Bahía modificando la mezcla y estratificación. La marea influye durante las pleamares y bajamares en la estratificación del fondo a la superficie. Las corrientes son del orden de 2 a 5 cm/s en la superficie y son influenciados por el viento, mientras que en el fondo son de 2 a 3 cm/s y responden al flujo y reflujo de la marea.

**Palabras claves:** Hidrodinámica, Simulación, Circulación, Forzantes Físicos

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

La dinámica del océano puede ser analizada en diferentes escalas de espacio y tiempo; los estudios de la dinámica de gran escala se refieren a estudios que cubren todo el planeta, mientras que los de mesoscala se restringen a estudios de áreas del orden de  $10^3 \text{ km}^2$ ; esto deja a la zona costera y a los sistemas adyacentes al océano, dentro de lo que se conoce como oceanografía de pequeña escala.

Los procesos físicos que rigen cualquier masa de agua resultan ser tan complejos que es necesario dividirlos en dos campos principales: la hidrodinámica y la hidrostática. Sin duda la primera es más compleja que la segunda, ya que en ella se introducen factores externos al sistema. Estos factores se encargan de forzar el sistema y llevarlo desde estados relativamente simples a estados caóticos, como es el caso de ríos, lagos, mares y océanos.

En la oceanografía de pequeña escala, se considera como forzamientos externos del sistema, al viento, gravedad, morfología, condiciones ambientales, características del agua y variación del nivel de mar, siendo el último el más importante (Fischer et al., 1979). La variación del nivel de mar afecta de manera considerable la hidrodinámica de cualquier sistema conectado parcialmente a un océano o mar adyacente, como es el caso de lagunas costeras, estuarios, bahías y puertos. En la actualidad los puertos y bahías reciben un interés particular en el mantenimiento de la calidad del agua, debido a su inminente exposición a la industria pesquera, comercio y turismo en general.

En estos sistemas semicerrados existe un balance entre la intrusión de la marea, el esfuerzo del viento, la fricción con el fondo y los gradientes de densidad dentro del agua (Ramírez e Imberger, 2001).

La mezcla, inducida por viento y marea, influyen en la difusión y dispersión de contaminantes. Un sistema estratificado puede reducir la calidad del agua, aumentar los tiempos de residencia y terminar por deteriorar el sistema. La mezcla en estas zonas se presenta en dos escalas, la primera es determinada por la morfología del sistema y es del orden de  $10^3$  m, es en esta escala que ocurre la dispersión horizontal y se determina el tiempo de flujo del sistema. La segunda escala, generada principalmente por el flujo y reflujo de marea, se refiere a turbulencias pequeñas e intermedias (del orden de pocos metros), que controlan la mezcla vertical y generan una dispersión horizontal débil (Imberger y Di Silvo, 1992).

La dinámica compleja de cuerpos de agua costeros es también analizada por medio de modelos numéricos. En la actualidad existen modelos numéricos que simulan las principales características de cualquier sistema; con ellos se pueden estudiar los forzamientos por separado (viento, marea, entre otros) y evaluar cuál es el que domina los procesos de interés dentro del sistema, es decir mezcla, circulación, dispersión o tiempo de residencia. La ausencia de mezcla afecta la distribución de nutrientes y contaminantes; cuando ésto ocurre el sistema es gobernado por un régimen gravitatorio, que hace que el sistema interactúe entre mezclado y estratificado (Ramírez, 2001).

Existe una variedad de modelos numéricos, dentro de ellos los tridimensionales que brindan un panorama más adecuado sobre el sistema y existe una gran variedad de estudios sobre ellos: Casulli y Cheng (1992), Ranasinghe y Pattiaratchi (1998), Zakert et al. (2002), por mencionar algunos. En estos estudios se ha demostrado la confiabilidad de los modelos numéricos, lo que los convierte en una herramienta cada vez más utilizada.

El océano costero recibe en la actualidad gran atención debido a la creciente utilización de sus recursos. Las demandas para aumentar su desarrollo han dirigido a instituciones involucradas a investigar los mecanismos que dirigen y controlan la dinámica de la circulación de corrientes marinas. El conocimiento de la hidrodinámica es un factor básico para las pesquerías, el clima, el impacto ambiental, la contaminación, la ingeniería costera y las maniobras marítimas. Debido a la complejidad de los procesos oceánicos y de la zona costera, es una práctica común hacer representaciones simplificadas de procesos físicos, químicos o biológicos, buscando las leyes naturales que gobiernan tales procesos y bajo ciertas condiciones, encontrar una solución para un problema específico. Estas simplificaciones, abstraídas del océano complejo, forman lo que se conoce como modelo, que es una estructura conceptual basada en el conocimiento del sistema, obtenido de observaciones y razonamiento inductivo, que es representada por una combinación de elementos físicos y matemáticos. Por su naturaleza, la mayoría de los modelos numéricos usan métodos computacionales para resolver expresiones matemáticas que describen fenómenos físicos, químicos y biológicos. El uso de algunos métodos computacionales permite la solución de ecuaciones complejas que no pueden ser resueltas por métodos analíticos

Los tipos de modelos más importantes para la investigación de la circulación costera son (USACE, 1989):

1. Modelos hidrodinámicos: describen las componentes de velocidad, elevación de la superficie y la distribución de salinidad, temperatura (o cualquier constituyente pasivo).
2. Modelos de transporte de sedimentos: predicen la respuesta de la costa (erosión) a eventos naturales o modificaciones antropogénicas.
3. Modelos de calidad del agua: estiman las características físicas y las concentraciones de los componentes químicos del agua.
4. Modelos ecológicos: predicen las interacciones entre la calidad del agua y las comunidades acuáticas.

Los modelos numéricos se pueden clasificar como uni- (1D), bi- (2D), o tridimensionales (3D). Los modelos unidimensionales tratan el sistema promediando sobre una sucesión de secciones transversales. Estos modelos son aceptables en situaciones tales como canales con sección transversal relativamente uniforme y con líneas centrales cuyo radio de curvatura es relativamente grande comparado con la anchura, donde se asume a la densidad del agua uniforme sobre la sección transversal. Los modelos bidimensionales promediados en profundidad son los más comúnmente empleados y son adecuados para estudios en áreas donde la columna de agua está relativamente bien mezclada.

Los modelos bidimensionales lateralmente promediados se usan en estudios de cuerpos de agua relativamente profundos y estrechos, con una variación vertical significativa de la densidad (USACE, 1989).

Evidentemente, los modelos bidimensionales promediados en la vertical o lateralmente son incapaces de describir la estructura detallada de campos de velocidad y distribución de temperatura y salinidad; esto implica un promedio sobre el plano horizontal.

Esto es especialmente cierto en el caso de flujos recirculares generados por el viento o sobre una topografía compleja. Una descripción más completa puede ser resuelta por modelos tridimensionales. Estos modelos son descripciones en términos de tres variables independientes del espacio ( $x, y, z$ ), que generalmente varían con respecto al tiempo (Abbott y Price, 1993). Los esfuerzos para describir la circulación costera tridimensional se iniciaron en los años setenta con los trabajos de Liggett (1969), Leendertse et ál., (1973), Heaps (1973) y Sundermann (1975). Desde 1990, con el desarrollo de esquemas semi-implícitos de diferencias finitas, una familia de modelos TRIM (Tidal, Residual, IntertidalMudflat), desarrollada por V. Casulli y colaboradores (Casulli y Cheng, 1992; Casulli y Cattani, 1994; Casulli y Stelling, 1998; Casulli y Walters, 2000), han realizado aplicaciones para resolver flujos en 2D y 3D, usando o no aproximaciones hidrostáticas.

TRIM ha sido aplicado en diversos casos de estudio, tales como circulación en la Bahía de San Francisco (Cheng et ál.,1993) y patrones de mezcla y plumas boyantes en la laguna de Barbamarco en Italia (Ramírez y Imberger, 2002). Tomando como base este modelo, TRIM, Ben R. Hodges de la University of Western Australia desarrolló el modelo computacional Estuary and Lake Computer Model (ELCOM) (Hodges et ´al., 1999). El método numérico de ELCOM toma su estructura básica del esquema de TRIM, con adaptaciones para mejorar su precisión, la conservación de escalares, la difusión numérica y el desarrollo de un esquema de cerradura basado en una capa de mezcla por viento.

## **1.1 ANTECEDENTES**

La Reserva Nacional de Paracas (RNP) fue creada mediante D.S. N° 1281-75-AG en 1975. El propósito fue de preservar y utilizar sosteniblemente muestras representativas de formaciones naturales y diversidad biológica existentes en las provincias biogeográficas del desierto Pacífico Subtropical y desierto Pacífico Templado Cálido (Udvardy J.R 1980). La RNP posee 335,000 hectáreas; de estas 217,594 hectáreas son marinas y 177,406 hectáreas son terrestres. Su altitud va desde el nivel del mar hasta los 786 metros de altitud. La RNP tiene un clima de temperatura entre los 15.5°C y 22°C como promedio de los meses más fríos y calurosos respectivamente. La precipitación anual es de 2 mm.

La hidrografía de la Bahía de Paracas toma importancia en los años noventa con énfasis en estudios biológicos sobre el fitoplancton (Durán, 1990). En principio, los estudios son orientados a la circulación debida al viento y su capacidad de transporte. Las conclusiones de estos estudios adolecen del desconocimiento de los factores que determinan la circulación, como el caso de la presencia de aguas frías procedente de capas subsuperficiales del Océano Pacífico. No obstante, es encomiable el esfuerzo realizado en la adquisición de datos hidrográficos. Es en esta toma de datos donde se fundamentan trabajos posteriores, donde a partir de este momento, la hidrografía de la Bahía de Paracas fue descrita desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo en forma intensiva.

Los modelos numéricos aplicados al ambiente marino resuelven las ecuaciones de balance de fluidos asistidos por medios computacionales. Estos modelos constituyen una herramienta para el estudio del medio marino, para diagnóstico y pronóstico de la hidrodinámica. Los modelos numéricos han tenido un desarrollo en las últimas décadas por la evolución de los medios informáticos y computacionales. Una consecuencia de esto es el aumento en rapidez de cálculo y en memoria disponible.

Ejemplos pueden encontrarse en la bibliografía (**Carbonel C. 1982; Backhaus, 1983; Blumberg & Mellor, 1983; Nihoul, 1984**).

Las áreas costeras como es el caso de la Bahía de Paracas, han sido tratadas por diferentes autores utilizando modelos numéricos. **Yzocupe, V. A. (2001)**, desarrolló un modelo hidrodinámico numérico 2D para el estudio de la circulación producida por la marea y el viento en la Bahía de Paracas, basado en el esquema de diferencias finitas explícito de Fisher's, **Yzocupe, V. A. (2005)** aplicó un modelo de dispersión de contaminantes en aguas rasas para reproducir los patrones de transporte de contaminantes como respuesta a la geografía y al sistema de vientos en la región.

En las últimas dos décadas se han desarrollando gran variedad de modelos numéricos que resuelven ecuaciones de momentum, continuidad y transporte de escalares. Estas ecuaciones diferenciales describen el campo de velocidad, transporte de escalares, evolución de la superficie libre y fricción con el fondo.

Estos modelos son forzados generalmente con calentamiento en la superficie, viento, gradientes de densidad del agua y la onda de marea. En la actualidad existen modelos de 1D, 2D y 3D. Los modelos 3D son los que dan una visión más general sobre el sistema en estudio debido a que permiten observar la evolución del sistema en escala espacial (**Fischer et al., 1979**). Los modelos tridimensionales son también conocidos como modelos de niveles o capas; se han desarrollado en dos formas básicas; Integrales y diferenciales (**Niller y Kraus, 1977**).

En los modelos diferenciales, las ecuaciones de transporte de momentum, calor, salinidad y energía cinética turbulenta se aplican en su forma original, sin ser integradas sobre las capas de diferente profundidad; de esta manera el sistema se resuelve para cada capa en particular (**Mellor y Yamada, 1974**); (**Mellor y Yamada, 1982**). En los modelos integrales las capas son asumidas como distribuciones verticalmente uniformes de temperatura,



salinidad o cualquier otro escalar y las ecuaciones son resueltas integrando sobre las capas de distinta profundidad **(Spiegel et al., 1986)**.

Al seleccionar el modelo numérico se debe dar énfasis al conocimiento previo de la zona a simular y los resultados que se esperan obtener. Un modelo verticalmente integrado no muestra las características particulares de un estuario o la estratificación por convección de un lago, mientras que un modelo diferencial de capas es demasiado complejo para predecir la circulación inducida por viento en una bahía.

En la actualidad el desarrollo de los modelos numéricos se ha convertido en una herramienta de importancia, con la cual se estudian y explican una gran variedad de procesos físicos. Tartinville et al. (1996) aplicó un modelo numérico para complementar mediciones de campo y evaluar el tiempo de residencia dentro de una laguna expuesta a contaminación por radiación nuclear. Ranashinghe y Pattiaratchi (1998) definieron las características de flujo en un estuario con conexión estacional al mar adyacente. Mediante varios casos de simulación definieron cual era el agente dominante de las características de flujo y numéricamente cambiaron de lugar la boca de conexión, para observar si disminuían los tiempos de flujo, en el supuesto caso de abrir una boca artificial. Ramírez y Imberger (2002) aplicaron un modelo numérico para evaluar la hidrodinámica de una laguna costera; el modelo aplicado permitió evaluar el transporte de masa y las principales características de circulación, mezcla y estratificación. Laval e Imberger (2003) utilizaron datos de campo y un modelo numérico para definir el transporte de masa entre el Lago Maracaibo y el Golfo de Venezuela. Demostraron la sensibilidad del modelo para reproducir las condiciones reales de circulación, mezcla, campo de velocidades y tiempos de residencia. La aplicación de modelos numéricos en diferentes sistemas, así como la reproducción de los distintos procesos físicos, les da mayor confiabilidad en su uso. La visión general que brindan y la facilidad de hacer predicciones a corto, mediano y largo plazo, los hace sin duda una herramienta eficaz **(Ramírez, 1999)**.

## **1.2 OBJETIVO**

El objetivo del presente trabajo es aplicar el modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM para simular el patrón de la circulación general en la Bahía de Paracas, con énfasis en los datos obtenidos que fueron utilizados como forzamientos del sistema, para realizar las simulaciones numéricas y de esta manera determinar la circulación dentro de la Bahía.

Este objetivo contempla los siguientes objetivos particulares:

1. Determinar el comportamiento hidrodinámico de la circulación tridimensional en la Bahía de Paracas.
2. Validar el modelo con datos de campo mediante series de tiempo de temperatura, salinidad y velocidad de corrientes.

## **ÁREA DE ESTUDIO**

La Bahía de Paracas se localiza en Provincia de Pisco, Departamento de Ica, entre los 13°47'2" a 13°51'5" S y 76°15'0" a 77°18'5" O. La Bahía y alrededores, se denomina "zona de Pisco", por las características morfológicas del litoral y la batimetría (ver figura 3.3). La zona comprendida entre Caucato, la desembocadura del río Pisco y el fondo de la Bahía se encuentra casi al nivel del mar, profundizándose en Punta Sequión y Punta Pejerrey. Aquí se inicia la zona de acantilados. El relieve del fondo submarino frente al borde costero de Pisco es de suave pendiente, haciéndose marcado frente a la desembocadura del río Pisco. La configuración geográfica de la Península de Paracas y la Isla San Gallán son las características geográficas más relevantes. Al Sur está el área de afloramientos intensos y permanentes de San Juan en donde la circulación superficial es forzada por vientos. Los principales factores en el desarrollo económico de la ciudad de Pisco son el turismo, la pesca y la industria de transformación pesquera.

La Bahía de Paracas ha logrado un desarrollo industrial durante los últimos años, siendo la pesquería la actividad más importante de la región por la presencia de fábricas dedicadas a actividades conserveras y productoras de harina y aceite de pescado. La producción genera gran cantidad de materia orgánica en suspensión, grasas, aceites y otros residuos que son arrojados al ecosistema marino (Jacinto M.E. 1996)

En la Bahía se encuentra el puerto San Martín donde se desarrolla la actividad portuaria. Dentro de la Bahía se reciben las descargas de los colectores urbanos y emisores submarinos provenientes de la zona urbana. Por otro lado la geomorfología costera protege la Bahía de corrientes y oleaje.

La Bahía presenta playas acantiladas y arenosas. Al Norte de la Puntilla hasta a San Andrés las playas son principalmente de cantos.

Los sedimentos en la Bahía de Paracas son de texturas limosas, limoarcillosas, arcilla y fango; están asociados a bajas intensidades de corrientes. Los sedimentos arenosos (arena y arenas limosas) que predominan, se distribuyen muy cerca de la costa. Esta estrecha franja costera se amplía cerca de la desembocadura del río Pisco, que es el principal afluente de material al mar. Cerca a la costa se incrementa la corriente y el oleaje, transportando el material más fino hacia lugares donde la corriente es menor y ocurre su sedimentación. En la zona Sur de la Bahía hacia la Puntilla se presentan mezclas de fango y arena (texturas de arcilla, arena arcillosa y fango). Frente a San Andrés existen fondos rocosos cerca de la línea de costa donde se presenta la mayor energía hidrodinámica ocasionada por el oleaje. Dentro de la Bahía la energía de las corrientes es menor, la morfología del fondo tiene una topografía plana y ciertas depresiones.



**Figura 1.1: Localización de la Bahía de Paracas**

## CAPITULO 2

### Marco Teórico

---

Este capítulo se presenta con la finalidad de brindar una visión general sobre el estado actual del conocimiento acerca de la hidrodinámica que caracteriza a bahías, puertos, estuarios y lagunas costeras. El conocer y entender cada uno de los factores que alteran y definen la circulación de estos cuerpos de agua, permitirá identificar y definir sobre bases sólidas, la hidrodinámica en la Bahía de Paracas.

#### 2.1. Introducción

En sistemas de aguas costeras semicerrados como lagos, esteros, puertos y bahías, el viento, la onda de marea, los gradientes de densidad del agua, las condiciones meteorológicas, la batimetría y las descargas de agua dulce inducidas al sistema son factores que compiten constantemente por modificar la circulación y, en otros escenarios la mezcla del sistema esta presente lo que da como resultado un sistema complejo e inestable (Fischer *et al.*, 1979).

En sistemas semicerrados de aguas costeras, donde la dinámica es controlada por las corrientes de marea, los intercambios surgen debido a que las distribuciones espaciales de las corrientes y de las propiedades transportadas, no son simétricas. Durante el flujo de marea el agua que entra al sistema (laguna costera, puerto o bahía) proviene generalmente de una región adyacente a esta y durante el reflujo las aguas regresan al océano en forma de un flujo concentrado. Si la concentración de propiedades del sistema es más elevada que el océano, resulta un flujo neto de la propiedad hacia el océano, aún sin un flujo neto de agua. Este mecanismo es más efectivo en presencia de una corriente a lo largo de la costa (*e.g.* Sistema de Corriente Costera), la cual asegura que el agua que fluye hacia fuera del sistema durante el reflujo sea

alejada de la entrada antes del siguiente flujo de la marea. En este caso una masa de agua completamente nueva, con las propiedades del océano adyacente, es introducida al sistema en cada ciclo de marea.

En una zona donde las surgencias costeras enriquecen los niveles superiores del océano, las aguas nuevas durante cada ciclo de marea favorecen también el enriquecimiento dentro del sistema.

El gradiente de densidad vertical es otro factor importante en el intercambio del agua entre un sistema semicerrado y el océano adyacente. El agua más salada y densa se transporta a lo largo del fondo hacia el océano, mientras que el agua menos salada y ligera lo hace hacia el interior del sistema cerca de la superficie, esta circulación de dos capas no solo transporta sal, sino también calor y otras propiedades químicas u orgánicas del agua (Bakun y Nelson, 1977).

El viento, la rotación terrestre y la fricción con el fondo son considerados factores secundarios que modifican en menor escala estos patrones de intercambio en sistemas semicerrado-océano, ya que sólo pueden apreciarse al eliminar el efecto de la marea (circulación residual o submareal). Sin embargo, son importantes, pues la circulación residual determina como se encuentra el sistema.

Stommel y Farmer (1972) encontraron que la rotación terrestre y la fricción con el fondo y paredes laterales, son los factores que determinan las zonas de entrada y salida de los flujos residuales. Valle Levinson et al. (2003) sugieren que la pendiente del nivel del mar en la boca de conexión de estuarios y bahías, es otro factor que ajusta o modifica las zonas de entrada y salida de flujos residuales; esta pendiente del nivel de mar depende a su vez del esfuerzo del viento, el gradiente de densidad transversal al canal y de la rotación terrestre.

## **2.2. Hidrodinámica de Sistemas Semicerrados**

Las investigaciones realizadas sobre la hidrodinámica de sistemas semicerrados, los definen como cuerpos de agua influenciados por la descarga de un río (agua dulce) y/o parcialmente conectados a un océano o mar adyacente (agua salada).

Sobre la base de la distribución agua salada-agua dulce, se ha logrado identificar cuatro tipos básicos de estuarios; cuña de sal, horizontalmente estratificado, verticalmente estratificado y verticalmente mezclado. La interacción entre estos cuatro tipos de estuarios da lugar a otro tipo de estuario, llamado estuario intermitente, en el que se pueden encontrar dinámicas representativas de los cuatro tipos básicos de estuarios, dependiendo de la época del año y de la intensidad de la descarga de agua dulce.

En ausencia de descarga de agua dulce se produce un tipo adicional de estuario llamado estuario inverso o hipersalino, en el que generalmente la salinidad se incrementa de la boca hacia la cabeza, debido al exceso de evaporación sobre precipitación (Tomczak, 2002).

Los conceptos clásicos sobre la hidrodinámica de lagunas, bahías, puertos o cuerpos de agua costeros, en general, consideran 3 agentes que modifican la dinámica de manera directa: la marea, las variables meteorológicas y la batimetría.

Estos forzamientos generan patrones de circulación inmediata y dan lugar a la formación de otros factores que empiezan a interactuar con ellos (apilamientos de agua, gradientes de presión, gradientes de densidad, entre otros), y que incluso en algunas ocasiones llegan a ser más importantes que los forzamientos primarios (Fischer et al., 1979).



Durante los años 1990 y 2000 los estudios se restringían solo a la medición de parámetros oceanográficos (salinidad, temperatura, densidad) durante periodos de tiempo cortos (2-3 días). Las corrientes, la presión, la batimetría eran parámetros difíciles de medir en áreas costeras por esos años. El uso de nuevas tecnologías de medición (ADCP's, CTD's, ecosondas, etc.) y de modelos numéricos y analíticos, fue el factor determinante que permitió ahondar en el estudio de la dinámica de estos sistemas.

Actualmente, la literatura sobre estos sistemas es basta y abarca diversos tipos de circulación. En bahías, puertos o lagunas costeras donde los gradientes de densidad vertical son despreciables, se ha demostrado que la dinámica obedece a los forzamientos de marea, viento y batimetría.

En particular el viento genera patrones de circulación superficial (Fischer *et al.*, 1979); esto favorece la mezcla vertical e incluso llega a afectar el nivel de mar (Bowden, 1978). Dentro de los estudios enfocados sobre el efecto del viento encontramos a (Argote *et al.* 1991) quienes encuentran la formación de dos giros en una bahía como respuesta al forzamiento de viento. La influencia del viento llega a ser tan importante que da lugar a diferentes dinámicas en función de la dirección del viento (Valle Levinson *et al.* (2001b)). Los autores encuentran también que bajo ciertas condiciones de viento, se genera apilamiento de agua y que a su vez induce corrientes.

En estos sistemas parcialmente conectados al océano adyacente, la marea es el agente que modifica en primera instancia la circulación (Fischer *et al.*, 1979; Tomczak, 2002). Por lo tanto, al eliminar el efecto del flujo y reflujo de la marea es posible observar el transporte neto o circulación residual dentro del sistema.

Diversos estudios han demostrado la dependencia de los patrones de circulación con la rotación de la tierra y los efectos de fricción inducidos por viento y marea (alta turbulencia).

Mediante datos (Valle Levinson et al., 2001a; Valle Levinson y Kamazima, 1997, 1995) y modelos analíticos (Valle Levinson et al., 2003; Kasai et al., 2000) se ha mostrado evidencia de que el intercambio entre los cuerpos de agua costeros y el océano adyacente, se restringe a los canales profundos y a los "bajos" como respuesta al balance entre los efectos de la rotación de la tierra y los efectos de fricción.

Experimentos de campo indican que los eventos de estratificación y desestratificación son comunes en este tipo de sistemas (Ramírez y Imberger, 2000). Las variaciones en tiempo y espacio de las características de mezcla dependen directamente de la variación de los factores que la domina. Es decir, la zona que experimenta los mayores gradientes de densidad y por lo tanto de estratificación y circulación termohalina, es la zona directamente afectada por la descarga del río (Schroeder *et al.*, 1990). En el caso de una bahía la zona menos propensa a estratificación es la boca de conexión con el océano, debido a la constricción morfológica que ocasiona un aumento en la velocidad de las corrientes.

## **CAPITULO 3**

### **METODOLOGÍA**

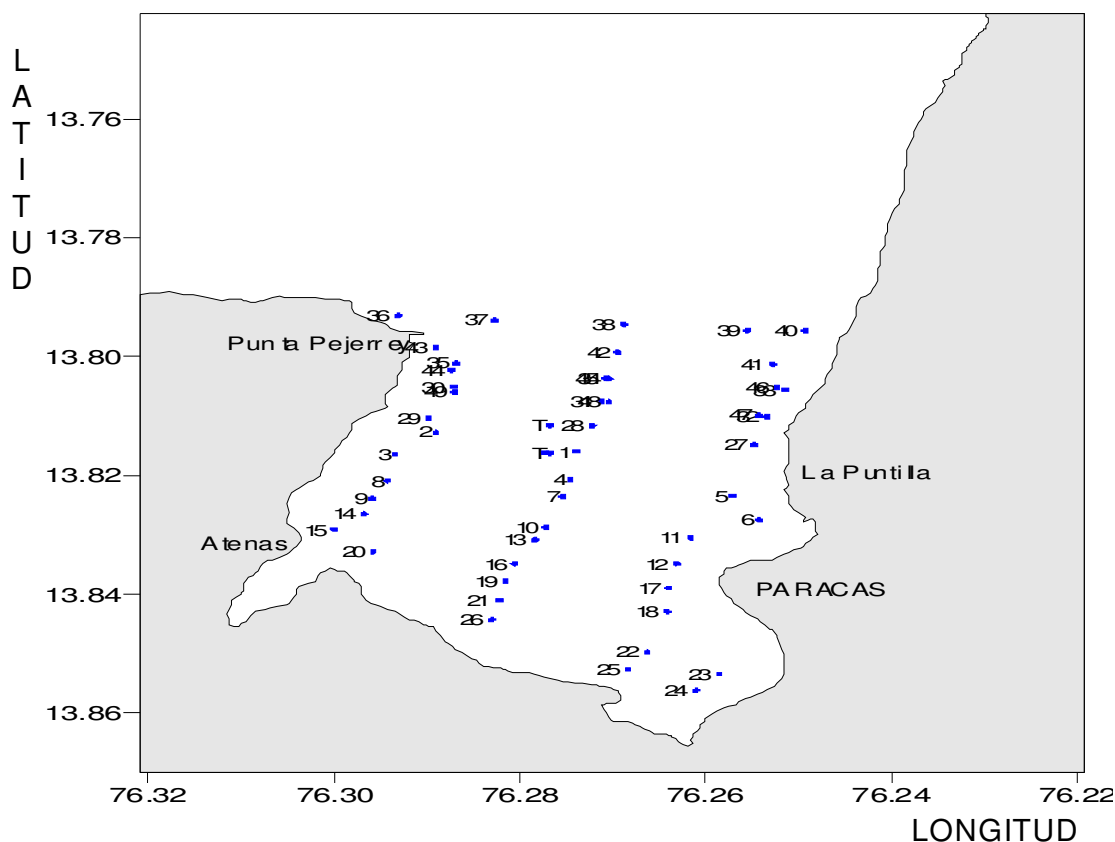
---

El trabajo se basa en los datos obtenidos en la Campaña de Mediciones Oceanográficas en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú, durante Mayo del 2005. Utilizando esos datos se caracterizó la hidrografía de la Bahía de Paracas, tanto para la distribución de parámetros oceanográficos como para la velocidad de las corrientes a diferentes profundidades. La información recopilada fue utilizada para aplicar el modelo.

En este capítulo se describe el procedimiento del trabajo, la campaña de medición, la instrumentación utilizada, la metodología del procesamiento de los datos y finalmente las simulaciones numéricas realizadas para la campaña de medición.

#### **3.1 LAS MEDICIONES**

Durante la campaña de mediciones oceanográficas se obtuvieron datos de temperatura, salinidad, densidad, velocidad de las corrientes y variables meteorológicas. El monitoreo se realizó siguiendo el recorrido de estaciones (ver figura 3.1). La campaña fue de dos días; se programó el muestreo con periodos de 12 horas; esto permitió observar el estado del sistema durante la pleamar y bajamar. La campaña de mediciones fue realizada el 14 y 15 de mayo del 2005 durante 12 horas cada día.



**Figura 3.1: Estaciones de muestreo de la campaña de mediciones Bahía Paracas**

### 3.1.1. INSTRUMENTACIÓN

#### Geo-posicionamiento

El sistema GPS (<sup>1</sup>) o Sistema de Posicionamiento Global es un sistema compuesto por una red de 24 satélites denominada NAVSTAR, situados en una órbita a una distancia de 20,000 km de la Tierra; dispone de unos receptores GPS, que permiten determinar la posición en cualquier lugar del planeta, de día o de noche y bajo cualquier condición meteorológica. El sistema calcula la posición geográfica a partir de señales

<sup>1</sup> Acrónimo de Geographical Positioning System

satelitales sincronizadas en el tiempo (triangulación satelital) en base a un mínimo de 4 satélites visibles de los 24 que se encuentra en órbita.

Las aplicaciones del sistema GPS son variadas en tanto que pueden comprometer todas aquellas cantidades físicas cuya localización geográfica sea necesaria y aún más si requiere de atributos como lo es la profundidad o altura de un punto con respecto al nivel medio del mar (NMM). La posición, tiempo de registro y atributos de cada entidad pueden además ser registradas mientras se realiza cualquier tipo de desplazamiento en tierra, agua o aire. El GPS que se utilizó fue marca GARMIN Electronics, modelo GPSMAP 185 Sounder. Las especificaciones técnicas del GPSMAP 185 se muestran en la tabla I.

**Tabla I : Especificaciones técnicas del GPSMAP 185 Sounder**

<b>Característica</b>	<b>Especificación</b>
Receptor GPS	Receptor diferencial, de 12 canales paralelos
Razón de muestreo	1/segundo
Coordenadas	Lat/Lon, UTM/UPS
Exactitud en posición	10 metros, 1-5 metros con DGPS
Interfaces	NMEA 0183, RTCM 104 correcciones DGPS
Frecuencia de ecosonda	200 KHz
Rango de profundidad	0.5 – 400 m
Exactitud de profundidad	0.1 m
Sensor de temperatura	Acoplado en el transductor del ecosonda
Rango de temperatura	-15 a 70°C
Exactitud	± 0.5°C

## CTD

Con el propósito de obtener mediciones de parámetros oceanográficos se utilizó un sensor de conductividad eléctrica, temperatura y profundidad (CTD)<sup>(2)</sup>, marca Seabird, modelo SBE 19plus Seacat Profiler. El CTD cuenta con una unidad submarina, provista de sensores de: presión (SBE29), temperatura, oxígeno (SBE43), pH (SBE18), fluorómetro WetStar (Wet Lab) y turbidez. La razón de muestreo fue de 4 muestras por segundo (4 Hz). Los datos fueron almacenados en su memoria estática CMOS de 1024 Kb. Para la extracción de los datos, el CTD se conectó a una computadora personal y mediante el software Sea Term de SeaBird Electronics se bajaron los datos.

Para mayor información sobre el funcionamiento del CTD, se sugiere consultar el manual de operación del instrumento (Sea-Bird, 2002). Las especificaciones de los sensores se muestran en la Tabla II.

**Tabla II: Especificaciones técnicas del CTD Marca Seabird**

Rango de medición	Temperatura	-5 a 35 °C
	Conductividad	0 a 9 S/m
	Presión	0 a 10000 m
	pH	0 a 14
	Oxígeno	120 % de saturación
	Fluorómetro	0 a 4000 ppt
	Turbidez	0 a 2000 NTU
Exactitud	Temperatura	0.005 °C
	Conductividad	0.0005 S/m

---

<sup>2</sup> Acrónimo de Conductivity, Temperature, Depth

	Presión pH Oxígeno Fluorómetro Turbidez	0.1 de la escala completa 0.1 2 % de saturación 0.050 ppt 0.1 NTU
Resolución	Temperatura Conductividad Presión pH Oxígeno Fluorómetro Turbidez	0.0001 °C 0.00005 S/m 0.02 de la escala completa 0.1 2 % de saturación 0.0125 ppt 0.1 NTU

## ADCP

Para medir las componentes de velocidad de las corrientes, tanto en magnitud como en dirección a diferentes profundidades, se utilizó el perfilador acústico por efecto Doppler, ADCP <sup>(3)</sup> modelo Workhorse Sentinel 1200 KHz, fabricado por RD Instruments. El instrumento tiene sensores de temperatura, inclinación, brújula y una memoria interna con capacidad de 10 Mb. Las especificaciones de los sensores se muestran en la tabla III.

Para la campaña de medición el ADCP se programó usando un ancho de celda de 0.5 cm, 20 pulsos por ensamble cada segundo para ir midiendo de manera continua en todas las estaciones, luego para mejorar la recolección

---

<sup>3</sup> Acrónimo de Acoustic Doppler Current Profiler

de datos los pulsos por ensamble se incrementaron a 100 y los ensambles fueron grabados en memoria cada cinco minutos.

**Tabla III: Especificaciones técnicas del ADCP Workhore Sentinel de RDInstruments**

Parámetros de perfilación	Resolución	0.001 m/s
	Rango de velocidad	$0 \pm 20$ m/s
	Número de celdas	1 - 128
Transductor	Ángulo transductor	20 ° 21 °
	Configuración	4 transductores convexos
	Memoria interna	Tarjeta PCMCIA con capacidad de 10 Mb
	Comunicación	Puerto Serial RS-232



Sensores	Temperatura	Montado en el transductor Rango: - 5 a 45 °C Precisión: $\pm 0.4$ °C Resolución: 0.01 °C
	Inclinación	Rango: $\pm 15$ °C Precisión: $\pm 0.5$ °C Resolución: 0.01 °C
	Brújula	Exactitud: $\pm 2^\circ$ Precisión: $\pm 0.5^\circ$ Inclinación máxima: $\pm 15^\circ$

## CADENA DE TERMISTORES

Mediante una cadena de termistores se obtuvo la distribución temporal de la temperatura en la vertical. Se utilizó 04 termistores que fueron distribuidos sobre la cadena, el primero colocado a 2m de profundidad, el segundo a 4 m, el tercero a 6 m y el cuarto a 8 m de profundidad.

La cadena estuvo anclada al fondo, con una boya en la superficie que mantuvo la cadena en posición vertical.

El registro de los datos fue cada 5 minutos en las estaciones 16 y 32 (Figura 3.1)

Los termistores fueron de marca ONSET modelo StowAway TidbiT

Las características técnicas se presentan en la tabla IV

**Tabla IV: Especificaciones técnicas de los termistores Marca ONSET**

Profundidad de operación	1000 pies
Batería	5 años
Memoria	32520 Mb
Dimensiones	30 mm diámetro 17 mm ancho
Rango	- 4 °C a + 37 °C
Exactitud	0.2 °C
Resolución	0.16 °C

### **3.1.2. NIVEL DEL MAR**

La variación del nivel del mar fue proporcionada por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina. El nivel de referencia fue el nivel medio del mar [NMM].

### **3.1.3. METEOROLOGÍA**

Los datos fueron colectados con una estación meteorológica marca Davis modelo Weather. La estación fue ubicada en el Laboratorio de Pisco del Instituto del Mar del Perú. Las variables medidas fueron: temperatura del aire, magnitud y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa y presión. Las características técnicas se presentan en la tabla V.

La Dirección de Meteorología, Departamento de Climatología de la Estación de Pisco, también proporcionó datos de las variables meteorológicas para el mes de mayo 2005

**Tabla V: Especificaciones técnicas de la estación meteorológica Davis**

Sensor	Rango	Exactitud
Temperatura	- 20°C a 60°C	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Dirección del viento	16 puntos (22.5°) de compás	$\pm 7^{\circ}$
Velocidad del viento	0.9 a 78 m/s	$\pm 5 \%$
Presión Barométrica	880 a 1080 mbar	$\pm 1,7 \text{ mb}$
Humedad	0 a 100 % HR	$\pm 5 \%$
Tiempo	-	$\pm 15 \text{ seg/mes}$

## 3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

### 3.2.1. HIDROGRAFÍA

El procesamiento de los datos se realizó siguiendo el procesamiento estándar del manual de cada uno de los equipos de medición.

El procesamiento de los datos del CTD se realizó siguiendo el procesamiento estándar del manual del *SBE19plus*, utilizando el software *SBE.Data Processing-Win32* del fabricante del instrumento.

El procesamiento de los datos se realizó de manera modular de acuerdo a lo siguiente:

- *DATCNV*: Transforma los archivos extraídos del *CTD* en formato hexagesimal a *ASCII* en unidades de ingeniería.
- *FILTER*: Aplica un filtrado pasabajos con 1 segundo en todas las variables
- *ALIGNCTD*. Avanza la temperatura relativa a la presión 0,5 s, para corregir el retraso del sensor de temperatura.
- *DERIVE*: Calcula la temperatura, salinidad, densidad, porcentaje de saturación de oxígeno, profundidad y velocidad de descenso.
- *SECCION*: Elimina valores menores a 1 m de profundidad, debido a errores externos.
- *BINAVG*: Promedia las mediciones cada 0,10 m.
- *ASCIIOUT*: Se utiliza para eliminar encabezados de los archivos y exportarlos como texto.

De esta manera se obtuvieron perfiles individuales en archivos independientes, de los cuales se conocía la posición, fecha y hora de la medición.

### **3.2.2. CORRIENTES**

Mediante el software proporcionado por el fabricante del RDI-Work Horse Sentinel, se extrajeron los datos de corrientes medidos con el ADCP. Se eliminaron todos los datos crudos que tuvieron un valor mayor a tres veces su desviación estándar y se eliminaron los datos con un error mayor a 0,0005 m. Se aplicó un filtro de promedios corridos de 10 puntos.

Se obtuvieron datos de magnitud, dirección, componente norte, componente zonal, componente meridional y velocidad relativa de la embarcación. Con la información colectada se obtuvo la orientación principal de la corriente y de su variabilidad.

### **3.2.3. CADENA DE TERMISTORES**

Una vez transferidos los datos a una computadora personal, mediante el software Boxear pro 4.7, se ordenaron en una matriz de “n” número de columnas (tiempo) por “m” número de filas (profundidad de la medida) y se les aplicó un filtro de promedios corridos de 5 puntos, para eliminar todas las frecuencias menores a 30 minutos. Los datos fueron interpolados a su respectiva profundidad y tiempo, con lo que se pudo observar la variación espacio-temporal de la temperatura en los puntos de los anclajes.

## **3.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA**

### **3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

Para el estudio de la simulación hidrodinámica de la Bahía de Paracas se implementó el Estuary and Lake Computer Model (*ELCOM*), desarrollado en el Centre for Water Research (CWR), de la Universidad de Western Australia (*UWA*) ( *B.R.Hodges, 2000*). El Modelo *ELCOM* utiliza principios hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua semicerrados y estratificados, distribuciones de velocidad, temperatura, salinidad y densidad sometidos a forzamientos físicos externos; por esto es considerado una herramienta de simulación numérica tridimensional para lagos, ríos y estuarios, que aplica módulos hidrodinámicos y termodinámicos. El modelo resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y el transporte de escalares para un flujo no permanente, no viscoso e incompresible, utilizando la aproximación de Boussinesq y la aproximación hidrostática para la presión. La solución

numérica de las ecuaciones se basa en el método semi-implícito de diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng (1992). El método de solución separa la mezcla y la difusión turbulenta de los cálculos de advección (Hodges, 2000). Los cambios en la evolución de la superficie fue modelada usando el esquema semi-implícito de Casulli y Catani (1994). La advección de momentum utilizó un esquema de Euler-Lagrange de Casulli y Cheng (1992), mientras que el transporte de escalares se realizó con un esquema de conservación de flujo con diferenciación explícita (ULTIMATE-QUICKEST) (Leonard, 1991) (Ver detalles del método numérico en anexo 1).

Las ecuaciones escritas para un espacio cartesiano con el eje z vertical, positivo hacía arriba son:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} - \frac{g}{\rho_\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_a^a \rho' dz \left( y \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_\beta} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\beta} \overline{u_\beta u_\alpha} - \epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left( k \frac{\partial C}{\partial x_\beta} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\beta} \overline{u_\beta c} + S \quad (2)$$

Donde:  $\eta$  es la altura de la superficie libre,  $f$  es el parámetro de Coriolis;  $\nu$  y  $\kappa$  son los parámetros de viscosidad turbulenta y difusividad turbulenta, y  $S$  representa fuentes escalares. Las letras latinas mayúsculas y minúsculas distinguen a los promedios de las cantidades fluctuantes relativas a la escala de tiempo promediada, con  $(U_i, u_i)$  representando los vectores de velocidad y  $(C, c)$  representando un escalar (e.g. temperatura, salinidad o concentración de trazadores) (Hodges et al., 2000).

Se usa notación tensorial con la convención de suma de Einstein, aplicada al espacio tridimensional para los subíndices latinos (*e.g.*  $j = 1, 2, 3$ ) y al espacio horizontal de dos componentes para los subíndices griegos (*e.g.*  $\alpha = 1, 2$ ). El tensor permutación de dos componentes  $\varepsilon_{\alpha\beta}$  está definido de tal manera que

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0 \quad ; \quad \varepsilon_{12} = 1 \quad ; \quad \varepsilon_{21} = -1 .$$

La evolución de la superficie libre se rige por la integración vertical de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles, aplicada a la condición cinemática de frontera (*Hodges et al., 2000*):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_b^\eta U_\alpha dz \quad (3)$$

La simulación de la turbulencia está basada en un modelo de capas para mezcla por viento, transportando momentum desde la superficie por medio de mezcla en regiones con gradientes de densidad inestable (*Hodges et al., 2000*).

El esfuerzo del viento en la superficie libre, fue calculado a partir de la velocidad del viento, de la siguiente manera:

$$\tau_\omega = \rho_a C_D |u_\omega| u_\omega \quad (4)$$

Donde:  $\rho_a$  es la densidad del aire tomada como  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $u_\omega$  es la velocidad del viento medida a 10 m sobre la superficie del agua.

Las ecuaciones se resuelven numéricamente sobre una malla cartesiana rectangular que permite  $\Delta x$  y  $\Delta y$  variables, con  $\Delta z$  variable como función de  $z$  pero horizontalmente uniforme. El grillado está basado en la malla de Arakawa-C (Arakawa y Lamb, 1977) con las velocidades definidas en las caras de la celda mientras que la concentración de los escalares y la altura de la superficie libre se definen en el centro. En el fondo se impone una condición de no-deslizamiento (Dirichlet) y una condición de gradiente-cero (Neumann) a los escalares. En las paredes laterales o fronteras sólidas (celdas consideradas tierra) se consideraron condiciones de deslizamiento libre para las componentes tangenciales, mientras que para las componentes normales se impuso la condición de no-flujo, es decir, gradiente cero a los escalares

Los procesos de simulación con el modelo ELCOM incluyen respuestas a flujos inducidos por cambios en la pendiente de la superficie del agua (respuestas barotrópicas), flujos inducidos por cambios en la densidad en cuerpos de agua no homogéneos (respuestas baroclínicas), efectos rotacionales, esfuerzos del viento, intercambio térmico superficial, caudales afluentes y efluentes, transporte de sal, calor y escalares pasivos (trazadores). Este modelo se puede usar en conjunto con un módulo de calidad de aguas, CAEDYM, para simular el transporte tridimensional y la interacción física, química y biológica del flujo.

Para realizar las simulaciones se preparó los datos en los formatos correspondientes relacionados con la geometría (batimetría) del dominio, las condiciones iniciales y de borde: los parámetros de configuración, de control y salida se ingresaron a través de archivos de entrada preparados manualmente. Una detallada descripción del Modelo ELCOM se puede consultar en los manuales del Modelo ([www.cwr.uwa.edu.au](http://www.cwr.uwa.edu.au)).



### **3.3.2. DATOS DE ENTRADA AL MODELO**

ELCOM requiere como datos de entrada la batimetría, series de tiempo de los forzamientos ambientales, condiciones iniciales y condiciones de frontera. A continuación se describe cada uno de ellos.

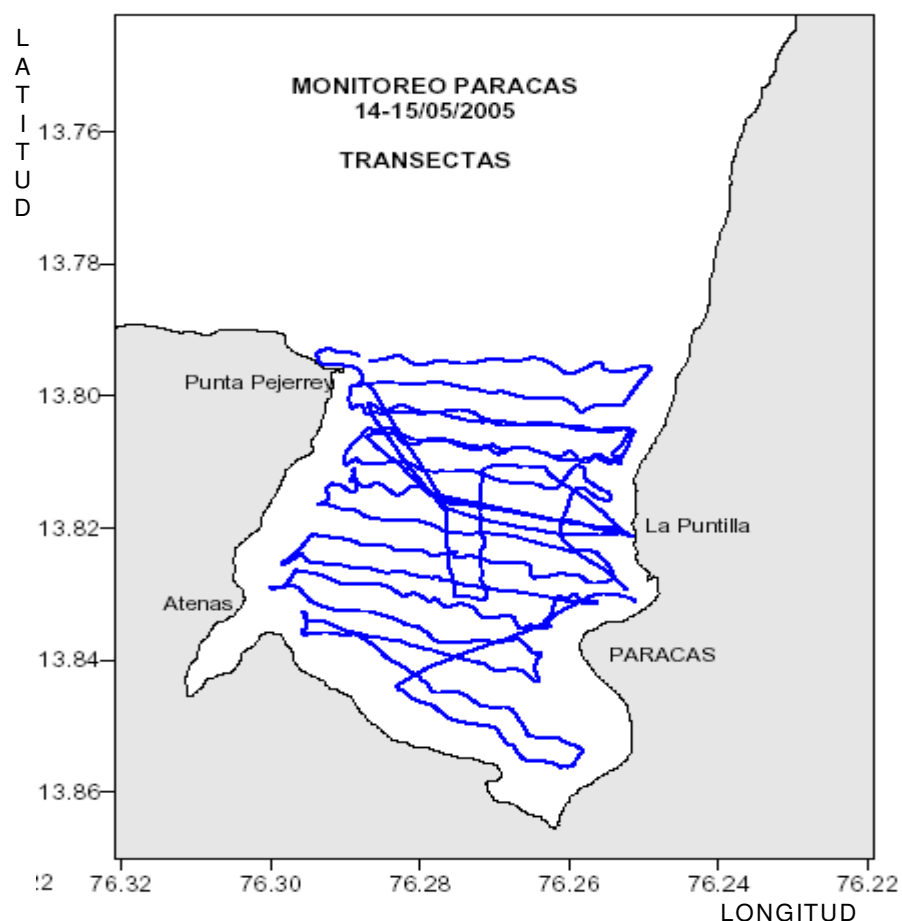
#### **3.3.2.1. BATIMETRÍA**

La batimetría utilizada en las simulaciones numéricas se obtuvo con datos de una campaña de campo realizada durante los días 14 y 15 de Mayo del 2005 (I. Ramírez, J. Quispe et ál., 2005). 4, 5 y 6 de abril del 2006 (I. Ramírez, J. Quispe, O. Morón, J. Tenorio et ál., 2006). Se utilizó la embarcación IMARPE VII del Laboratorio de Pisco perteneciente al Instituto del Mar del Perú, a la que se adaptó un GPS1 con ecosonda (modelo Garmin GPSMAP 185 Sounder), conectado a una computadora portátil. Las especificaciones técnicas del GPS se presentan en la Tabla I. Se utilizó un receptor de GPS diferencial (DGPS) para mejorar la exactitud de este sistema.

La batimetría de la Bahía de Paracas se obtuvo de las mediciones de profundidad medidas con un ecosonda acoplado al GPS. El ecosonda se adaptó a la borda de la embarcación, quedando el sensor a 0.5 m de profundidad. Durante la toma de datos la ecosonda registró profundidad y temperatura superficial enviándolos al GPS, a través de un software especializado, para posteriormente asignarles posición geográfica y hora de la muestra. Posteriormente los datos fueron transferidos a una computadora personal para su procesamiento.

Se realizaron varios transectos en el interior de la Bahía (*Figura 3.2*). Los datos registrados con el ecosonda fueron almacenados en una

computadora portátil. Los datos de posición en su forma original se registraron en coordenadas de latitud y longitud. Se generó un archivo con datos de tiempo, posición, profundidad y temperatura.

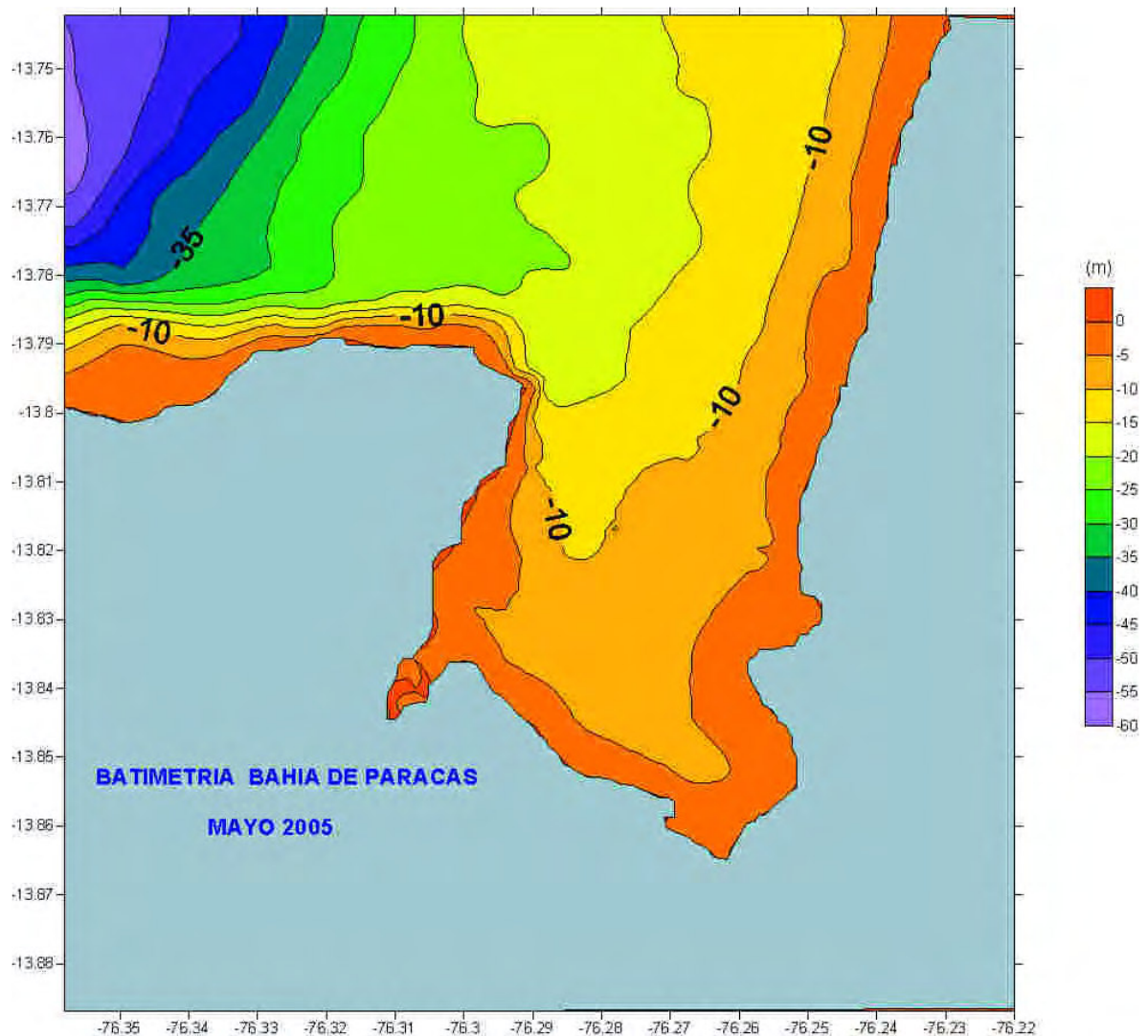


**Figura 3.2: Recorrido para obtener la batimetría de la Bahía de Paracas**

Posteriormente se interpolaron los datos de profundidad sobre una malla cartesiana, generando una distribución de profundidades (batimetría). Por convención, se asignaron los valores de profundidad como negativos y de esta manera la dirección del eje z cartesiano tomo el cero como el Nivel Medio del Mar.

Los datos medidos de batimetría fueron re-procesados para obtener una malla de profundidades con una resolución en  $\Delta x$  y  $\Delta y$  de 100 m.

La interpolación de la malla se hizo con la opción “Gridding” en SURFER (Golden Software). La malla se generó con el método de “Triangulación con interpolación lineal”. Los datos de profundidad fueron referidos al nivel medio del mar. La malla obtenida y utilizada para la simulación se muestra en la Figura 3.3.



**Figura 3.3: Batimetría de la Bahía de Paracas, 32 filas y 40 columnas, espacio de grilla para x e y de 100 m**

ELCOM permite diseñar una estructura en la vertical de capas horizontales de grosor variable. Se usaron 20 capas con  $\Delta z$  constante de 2 m. De esta manera fue posible obtener una malla relativamente más fina para regiones de interés, logrando un balance entre la resolución y desempeño del modelo.

Debido a la discretización espacial explícita que utiliza ELCOM, la exactitud computacional en 3D generalmente se ve reducida cuando el flujo no está alineado a la cuadrícula computacional. Por esta razón, la matriz de profundidades que representa la malla puede ser rotada en contra de las manecillas del reloj por medio de una transformación de coordenadas sobre las posiciones UTM  $x$  e  $y$ . Primero, las coordenadas son convertidas de cartesianas a polares:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right).r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

El ángulo de rotación puede ser sumado directamente a  $\theta$  (en radianes):

$$\theta_i = \theta + \frac{58}{180}\pi \quad (6)$$

La transformación se completa regresando de coordenadas polares a cartesianas:

$$x_i = r \cos(\theta_i).y_i = r \sin(\theta_i) \quad (7)$$

El paso final en el proceso de preparación de la batimetría para incorporar al modelo ELCOM fue identificar las celdas asignadas como tierra y las celdas de frontera abierta. La frontera abierta es considerada en aquellas celdas donde actúa el forzamiento de la marea. ELCOM tiene la opción de especificar los valores de la cuadrícula que señalan la tierra y las celdas de frontera abierta.

### 3.3.2.2. Forzantes Físicos

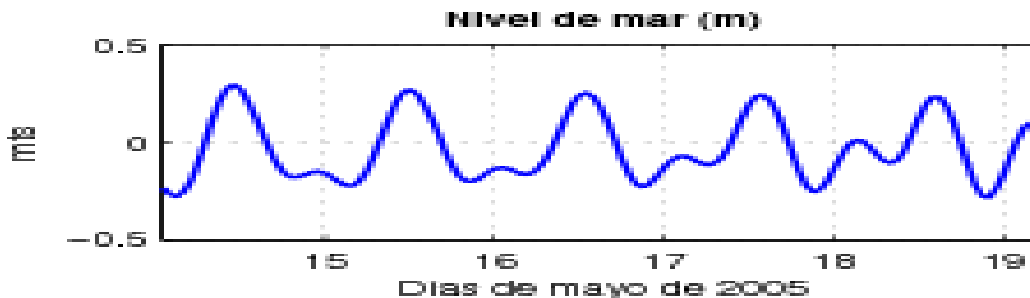
El modelo fue forzado con series de tiempo de marea, radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.

Las series de tiempo requieren un formato que consiste en un encabezado, seguido por columnas de datos. La primera columna debe tener el tiempo en día juliano; las siguientes columnas contienen los datos para ese instante de tiempo. El usuario no necesita dar información para el mismo intervalo de tiempo que la simulación usa ( $\Delta t$ ): el modelo interpola linealmente para encontrar el valor apropiado para un instante de tiempo específico.

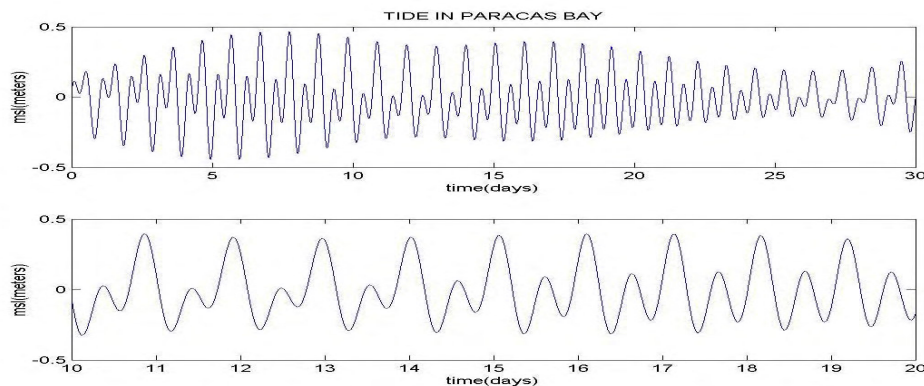
### MAREA

ELCOM utiliza el forzante de marea especificando la altura del nivel del mar en la frontera abierta. La variación del nivel de mar se obtuvo de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina. El nivel de referencia fue el nivel medio del mar [NMM].

Se elaboraron series de tiempo para la campaña simulada, con datos cada hora y referidas al Nivel Medio del Mar (NMM). La Figura 3.4 presenta las series de tiempo de marea para las simulaciones.



**Figura 3.4: Series de tiempo de nivel de mar, con que se forzó el modelo**



**Figura 3.4: Caracterización de la marea semidiurna en la Bahía de Paracas, usando el método armónico.**

### **CALENTAMIENTO SUPERFICIAL**

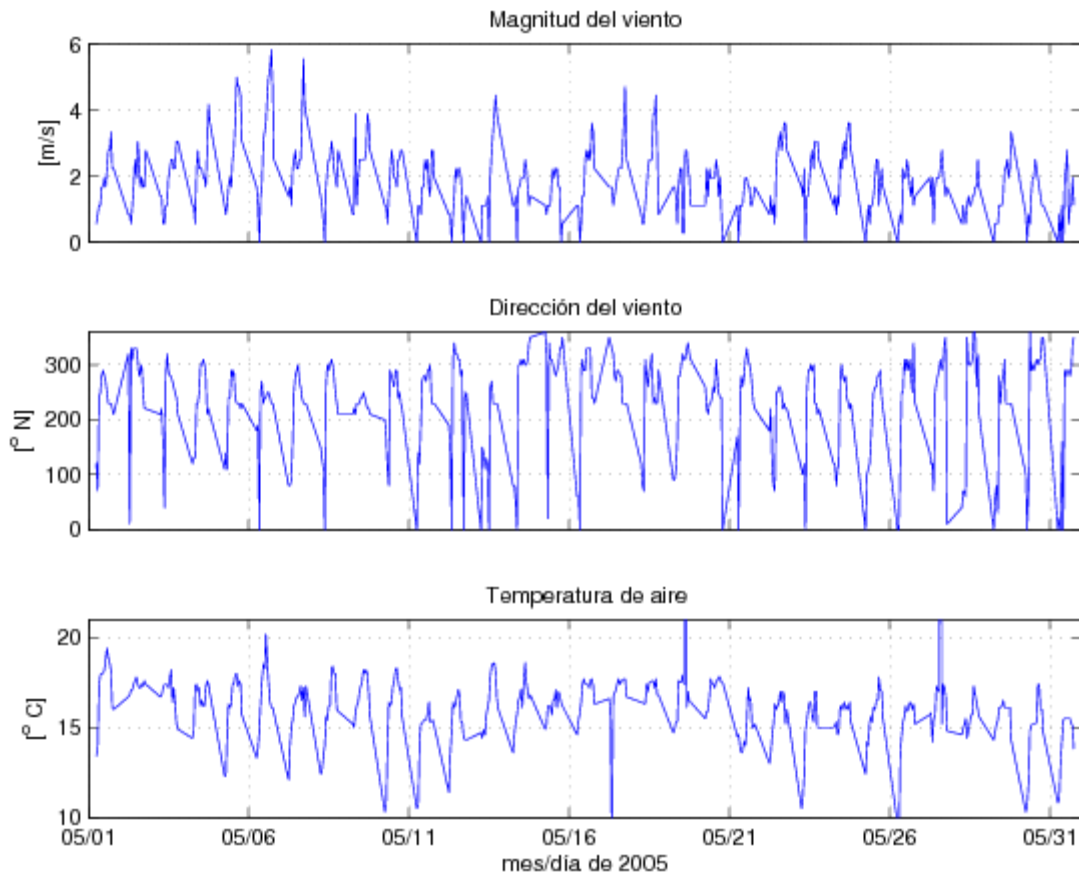
El módulo termodinámico de ELCOM controla los flujos de calor en la superficie libre. Es necesario proporcionar al modelo información en series de tiempo de: velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación solar, temperatura del aire y presión atmosférica.

Se utilizaron datos horarios proporcionados por la Dirección de Meteorología Aeronáutica, Dirección de Climatología, que cuenta con una Estación en el Puerto de Pisco. Los datos proporcionados fueron; temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.

### **VIENTO**

ELCOM tiene la capacidad de simular escenarios con viento que varía en escala temporal (magnitud y dirección). La fuente de datos de viento fue de la Estación Meteorológica de Pisco; en este trabajo se aplicó viento con velocidad y dirección uniformes en todo el dominio, variando en tiempo según la serie de datos proporcionada.

En la Figura 3.5 se presenta la serie de tiempo de los forzantes meteorológicos con las que se forzó el modelo para la campaña simulada.

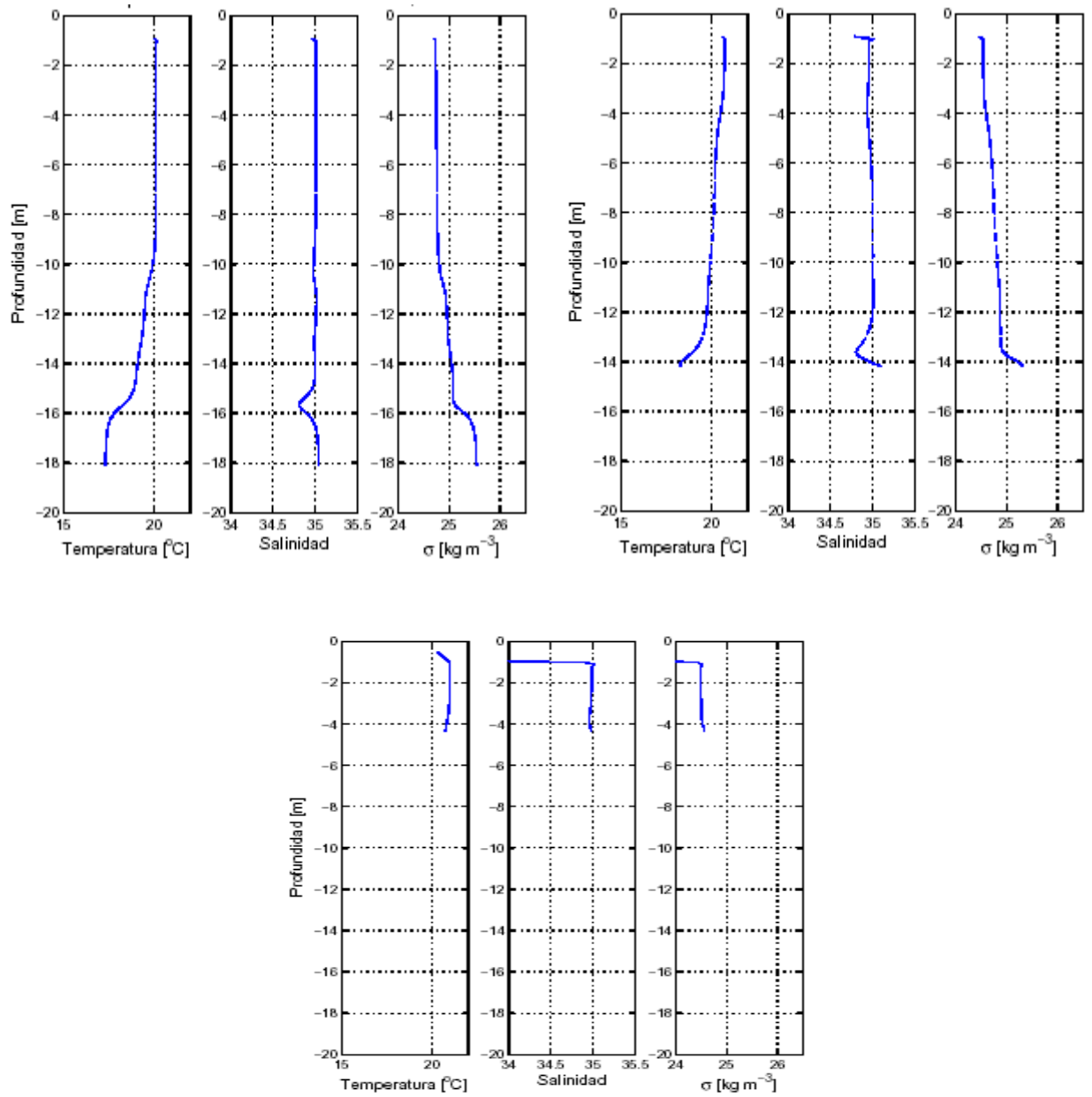


**Figura 3.5: Serie de forzantes meteorológicos utilizados en la simulación mayo 2005**

### 3.3.2.3. CONDICIONES INICIALES

Se utilizaron los perfiles de temperatura, salinidad y densidad medidos en la estación 1,4,28 en la parte central de la Bahía. Cada simulación fue alimentada con los perfiles medidos durante la campaña de mediciones correspondientes. La Figura 3.6 muestra los perfiles utilizados en la simulación, se puede apreciar la diferencia en la estructura vertical, durante la campaña.





**Figura 3.6: Condiciones iniciales durante la simulación Mayo 2005**

#### 3.3.2.4. CONDICIONES INICIALES EN LA FRONTERA ABIERTA

ELCOM permite alimentar la frontera abierta con una variación temporal de temperatura y salinidad, por lo que se utilizaron promedios verticales de los perfiles medidos en las estaciones 36, 37, 38, 39 y 40 ubicadas en la boca de acceso a la Bahía. La variación temporal para cada simulación fue tan larga como la duración de la campaña lo permitió. De esta manera, las simulaciones fueron alimentadas con una serie de entre 2 y 4 horas, que posteriormente se repitió para poder hacer simulaciones más largas. Detalles de condiciones iniciales y de frontera se presentan en el anexo 2.

#### 3.3.2.5. PASO DE TIEMPO

ELCOM es incondicionalmente estable para flujos barotrópicos y es capaz de producir resultados numéricos estables para cualquier tamaño de paso de tiempo. Sin embargo, para flujos estratificados, el método de solución discretiza explícitamente los términos baroclínicos en la ecuación 1, por lo que existe una restricción en el tamaño de paso de tiempo, basada en la condición de Courant-Friedrichs-Lewy para ondas internas (CFL), tal que  $CFL < \sqrt{2}$ , o:

$$\sqrt{g'D} \frac{\Delta t}{\Delta x} < \sqrt{2} \quad (8)$$

Los términos de la izquierda se conocen como el número CFL baroclínico ( $CFL_b$ ), donde  $g'$  es la gravedad reducida,  $D$  es la profundidad, y  $(g'D)^{1/2}$  es una aproximación de la velocidad de una onda interna. El valor de " $g'$ " se calcula con:

$$g' = g \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right) \quad (9)$$

donde  $\rho_0$  es una densidad de referencia. Se sustituyeron  $\rho$  y  $\rho_0$  con datos obtenidos para la Bahía, resultando un valor de  $g' = 0,0024 \text{ ms}^{-2}$  con  $D = 30 \text{ m}$ . Las ondas internas se propagan a  $C \approx \sqrt{g'D}$ , resultando una velocidad de  $U = 0,189 \text{ ms}^{-1}$ .

Así, el paso de tiempo máximo para una condición CFL limitante es:

$$\Delta t < \frac{CFL \Delta x}{U} \quad (10)$$

Considerando el escenario más restrictivo, con  $\Delta x = 30 \text{ m}$ , y  $U$  del  $O(1) \text{ ms}^{-1}$ , se obtiene  $\Delta t \approx O(10^2) \text{ s}$ .

Una restricción que toma importancia cuando se usan pasos de tiempo grandes en modelos geofísicos es si el campo de la velocidad se puede considerar de Lipschitz, esto es, si el campo es lo suficientemente suave para una aproximación numérica con el tamaño de malla y paso de tiempo utilizados (*Hodges et al., 2000*). La constante numérica Lipschitz  $B$  se define como una condición que debe ser menor que la unidad:

$$B = \left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\| \Delta t < 1 \quad (11)$$

Un método numérico puede ser estable para valores altos de  $B$ , pero los resultados no serían exactos. Esto establece un límite fundamental en el tamaño de paso de tiempo que se puede usar razonablemente en un

modelo como una función de la física del sistema en lugar de la estabilidad del método numérico.

Considerando esto, se hicieron varios cálculos para encontrar el paso de tiempo para las simulaciones realizadas en la Bahía. Se encontró que un paso de tiempo ( $\Delta t$ ) de 10 segundos da un buen balance entre exactitud, estabilidad y desempeño, permitiendo una razón de tiempo real/simulación de alrededor de 10. Se tomaron marcos instantáneos de las simulaciones cada hora simulada y se guardaron en disco.

### 3.3.2.6. SALIDAS DEL MODELO

Los resultados de *ELCOM* fueron almacenados en el formato **NETwork Common Data Form** (**netCDF**). Este formato es independiente de la plataforma y permite que el procesamiento de los datos pueda ser realizado en Linux o MS Windows. Los archivos netCDF se procesaron y visualizaron mediante MATLAB. Se desarrollaron rutinas para generar vistas horizontales y secciones verticales de las variables modeladas.

Las rutinas hicieron uso de la naturaleza cuadriculada de los resultados de *ELCOM*, donde para cada tiempo  $n\Delta t$ , el modelo guardó datos para cada celda del dominio  $x$ - $y$ . La información se guardó en series de arreglos tridimensionales, con el mismo formato que una matriz (arreglo bidimensional), excepto que el tiempo se guardó en una tercera dimensión.

Se realizaron simulaciones para la campaña de mediciones. Las variables simuladas fueron; distribución del campo de velocidad, temperatura, densidad, y salinidad. Los resultados son presentados en la sección IV.

## **CAPITULO 4**

### **Resultados y discusión**

---

Los datos obtenidos con ELCOM se presentan en tres grupos y/o categorías: a) secciones verticales, b) vistas horizontales y c) series de tiempo para una columna de agua. Un grupo y/o categoría se define como la salida de las simulaciones del modelo para las variables seleccionadas, sobre una sección del espacio, que evoluciona en el tiempo. Se realizaron simulaciones entre las 01:00:00 14-May-2005 y las 05:00:00 19-May-2005. La información se guardó en el disco cada 3600 s para un tiempo de simulación de 449972 seg. (5.2 días) y un paso de tiempo de 10 s; el número total de figuras generadas por las simulaciones realizadas en la Bahía de Paracas fueron de 1750. Por razones de espacio, sólo se presentan resultados de grupos seleccionados sobre la base de los siguientes criterios: importancia dinámica, información representativa y la capacidad de validar estos resultados con datos de campo.

La Tabla 3.1 describe las características de los grupos que se presentan en este capítulo.

#### **4.1. Secciones verticales**

La Figura 3.1 muestra la localización de la sección vertical obtenida con ELCOM. La posición de estas secciones se escogió sobre la base del muestreo de campo.

**Tabla VI: Características de los grupos de datos obtenidos**

<b>Categoría</b>	<b>Grupo</b>	<b>Comentario</b>	<b>Variables</b>
<b>Secciones horizontales</b>	<b>Superficie</b>	<b>Superficie libre</b>	<b>Velocidades Temperatura Salinidad Densidad</b>
	<b>Fondo</b>	<b>Capa de fondo</b>	<b>Velocidades Temperatura Salinidad Densidad</b>
	<b>Promedio vertical</b>	<b>Valor promedio en la columna de agua</b>	<b>Velocidad</b>
<b>Secciones verticales</b>	<b>Sección 1</b>	<b>Boca de conexión</b>	<b>Temperatura</b>

La sección vertical 1 es considerada sobre la boca de conexión, en línea recta perpendicular a la línea de costa entre Punta Pejerrey, con profundidad máxima de 15 m, hasta la parte norte de la Puntilla, con profundidad máxima de 5 m; es la boca de acceso a la Bahía (parte interna).

Las Figuras 4.2 a 4.7 muestran la distribución de la variable simulada. Los paneles representan marcos instantáneos para una fase de marea; la fecha, hora y el viento (magnitud y dirección) del periodo de simulación.

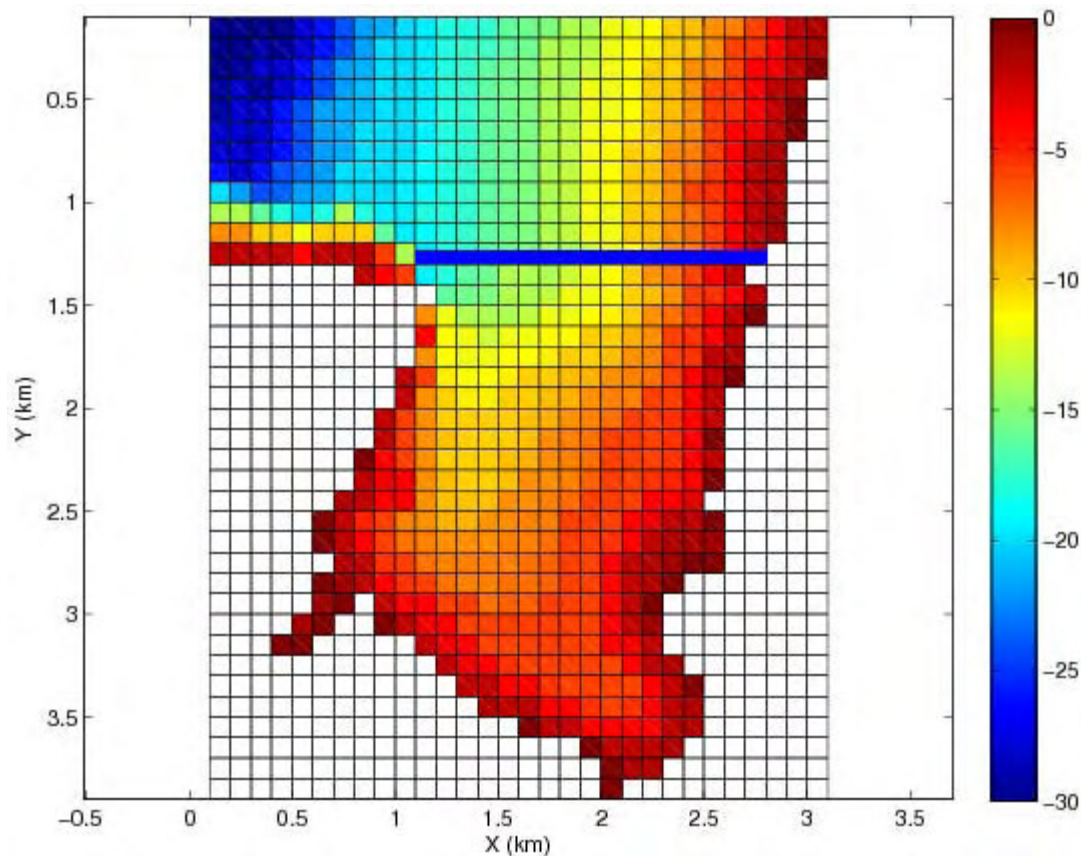
Las figuras de esta sección están ordenadas en paneles 1, 2, 3, 4, 5 y 6, que presentan en orden cronológico la variación diurna del sistema. Cada panel está compuesto de tres sub-figuras; en el lado izquierdo se presenta la distribución vertical espacio-temporal de la temperatura simulada. Una barra de color indica

la escala e intervalo de la temperatura durante la simulación. En el lado derecho se presenta dos sub-figuras: en la parte superior se muestra un “compás” de viento (magnitud y dirección) y en la parte inferior el nivel del mar. Cada panel muestra la fecha y hora, así como un indicador en cada sub-figura, que señala en que estado de marea y viento se encontraba el sistema durante la simulación.

En esta sección se presentan resultados obtenidos con ELCOM, que incluyen una descripción general de la circulación diurna en la Bahía de Paracas; esto incluye la variación espacial y temporal de temperatura, salinidad y densidad simulada en la Bahía de Paracas; y se presenta comparaciones entre los resultados obtenidos con ELCOM y los datos medidos en el campo. Todos los resultados anteriores son presentados para la campaña analizada en este trabajo.

#### **4.1.1. Temperatura**

La distribución vertical de la temperatura para la zona de conexión de la Bahía se muestra en la Figura 4.2. Esta sección evolucionó de la condición inicial como un sistema de tres capas (panel 1): una capa mezclada superficial de 5 m, una termoclina pronunciada con un cambio de 24.5°C a 10.5°C entre los 5 y 10 m de profundidad, y una capa mezclada en el fondo, de 10.5°C. En la boca de conexión se observaron variaciones de temperatura entre la superficie y el fondo y gradientes pronunciados de temperatura (Fodzar *et ál.*, 1985). Sin embargo, las variaciones de salinidad no fueron mayores a 0.1 UPS por lo que la estratificación observada puede considerarse función de la temperatura. Por otro lado, debido a la advección del sistema las temperaturas relativamente bajas entran por el fondo y lado Este e inundan toda la Bahía; sin embargo, en



**Figura 4.1: Localización de la sección vertical**

la superficie este sistema es estable posiblemente por la radiación solar y se puede apreciar una mezcla al final del 16 e inicio del 17-May-2005, que estaría asociado a un incremento del viento en esas fechas. Estudios recientes (Ramírez y Imberger, 2002; Balas y Ozhan, 2002) confirman la necesidad de aplicar modelos tridimensionales en aguas costeras ya que los gradientes de densidad verticales y horizontales son importantes. Las principales fuentes de calor disponibles para generar esta estratificación son la radiación solar y la diferencia de temperatura entre el agua y el aire (Cheng *et ál.*, 1993; Hodges *et ál.*, 1999).



Las simulaciones con ELCOM consideraron estas fuentes de calor. Las comparaciones de datos de campo y los resultados del modelo revelaron la importancia relativa de este forzamiento.

Fue evidente el debilitamiento de la estratificación y el hundimiento de la isoterma de 24°C; en esta zona se observó la intrusión de agua de menor temperatura que descendió abruptamente de 1 a 5 m de profundidad (panel 6). Este resultado puede compararse con la distribución de la temperatura dos días después, entre las 06:00 y las 23:00 15 May-2005 (ver Figura 4.5). Se puede observar que la temperatura de la capa mezclada descendió entre 2 y 3°C, aunque mantuvo el mismo grosor. Este enfriamiento puede atribuirse a una ligera disminución de la radiación solar y a un descenso de la temperatura del aire (ver Figura 3.5). El efecto del viento no fue significativo pero alcanzó un valor máximo de 4 m/s el día 17:00 16-May-2005, considerando que a media mañana (paneles 2 y 3) la isoterma de los 24°C fue horizontal, mientras que por la tarde presentó una pronunciada inclinación, aflorando a superficie en la zona Oeste frente a Punta Pejerrey (ver Figura 4.3 panel 6). Algo similar se observa al Norte de la Puntilla (ver Figura 4.6 panel 1). Este fenómeno se explica con el efecto del viento débil, típico en Paracas por las tardes. La noche de ese día, al debilitarse el viento, la isoterma comenzó a colocarse de manera horizontal, con ciertas ondulaciones en su frente, señal de la actividad de una onda interna con amplitud relativamente pequeña. También se apreciaron diferencias que podrían deberse a la marea, ya que durante la pleamar la capa mezclada del fondo limitada por la isoterma de los 10.5°C llegó a 7 m, mientras que durante el bajamar, esta isoterma se hundió a 5 m.

La variación vertical de la temperatura en la boca de acceso se muestra en la Figura 4.4. La estratificación observada en el panel 1 se debe a la condición inicial para temperatura en esta zona. Es notable la variación que se registró a lo largo del 15-May-2005 (ver paneles 1, 2, 3).

La estratificación se mantuvo a lo largo de todo el día, con un ligero debilitamiento durante la pleamar. Se observó una ondulación en la isoterma de los 14°C al inicio del bajamar de las 06:00 h, causada posiblemente por remolinos que se generan en la boca durante el cambio entre flujo y reflujo. Este efecto fue más pronunciado durante la marea viva (ver panel 5 de la Figura 4.5). La isoterma de 13.5°C fue desplazada 2.5 m hacia la superficie y regresó a su nivel horizontal a 5 m de profundidad cuatro horas después, durante un reflujo de marea. Es notorio el descenso general de la temperatura, comparado con la Figura 4.4, debido posiblemente al descenso de temperatura del aire registrado ese día (ver Figura 3.5).

Un resultado interesante producido por el modelo es la asimetría observada en la estructura vertical, en particular, en el arreglo de las isotermas en la boca. Esta asimetría sugiere que existe un forzamiento baroclínico que afecta a la Bahía desde la boca. En general, se tomaron precauciones para evitar que problemas relacionados con la metodología (*e.g.* la generación de la malla computacional) produjeran un sesgo en el comportamiento dinámico de la circulación. El siguiente paso lógico es realizar mediciones de campo para examinar con más cuidado el origen de las asimetrías observadas.

Se da una descripción más general de los procesos baroclínicos dentro de la Bahía, considerando que el gradiente de densidad está controlado principalmente por la temperatura. La Figura 4.6 presenta un ciclo de marea muerta mientras que la Figura 4.7 presenta un ciclo de marea viva. Se observó un patrón de estratificación que se intensificó a lo largo del día, con un engrosamiento de la capa mezclada. Es evidente, observando las Figuras 4.6 y 4.7 que la boca tiene un efecto importante en la dinámica, generando ondulaciones en el campo de temperatura de 0,5 m de amplitud. La zona profunda del canal frente a Punta Pejerrey fue la que presentó la intrusión de aguas frías provenientes del Sur que altero la dinámica propia de la Bahía.

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

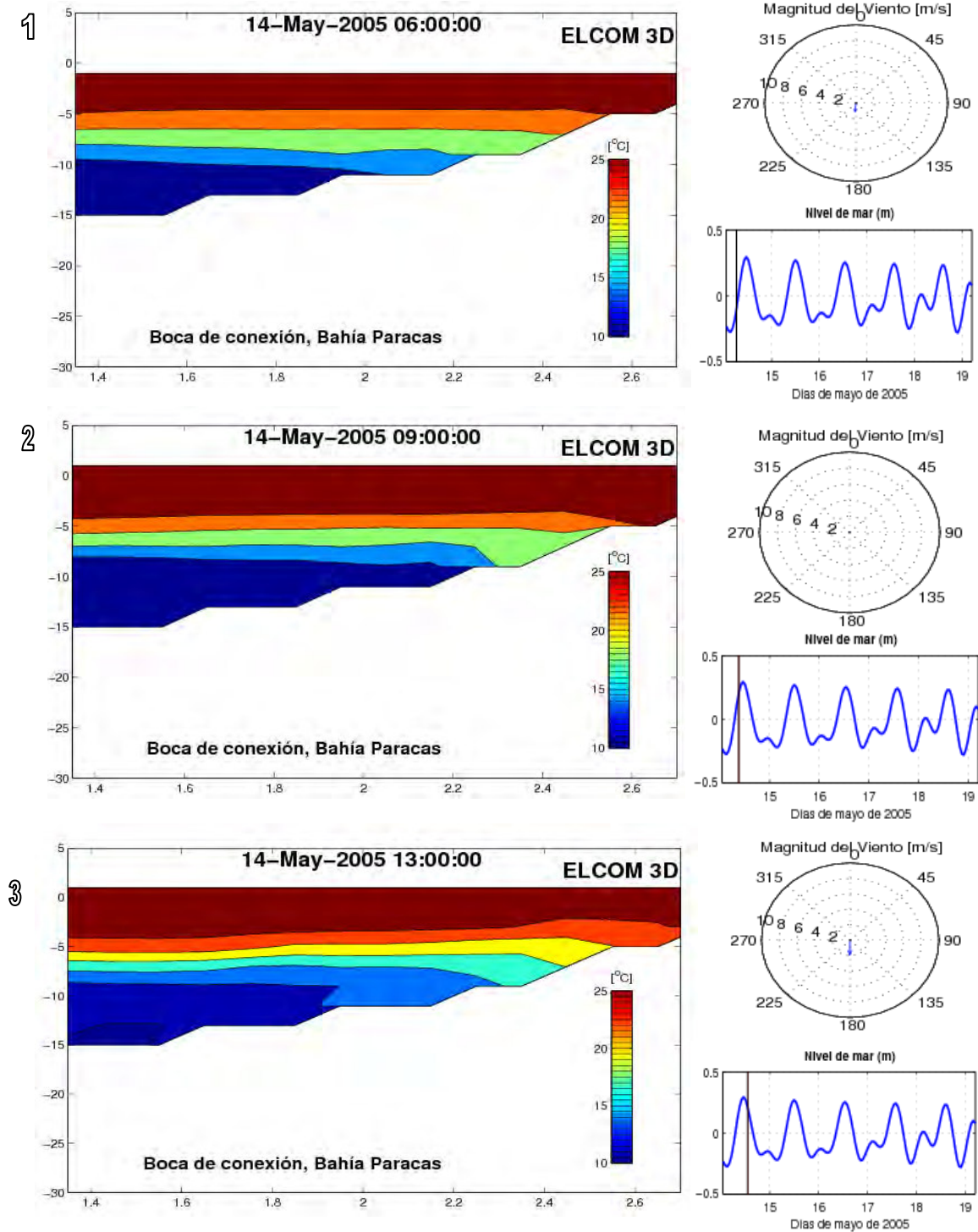
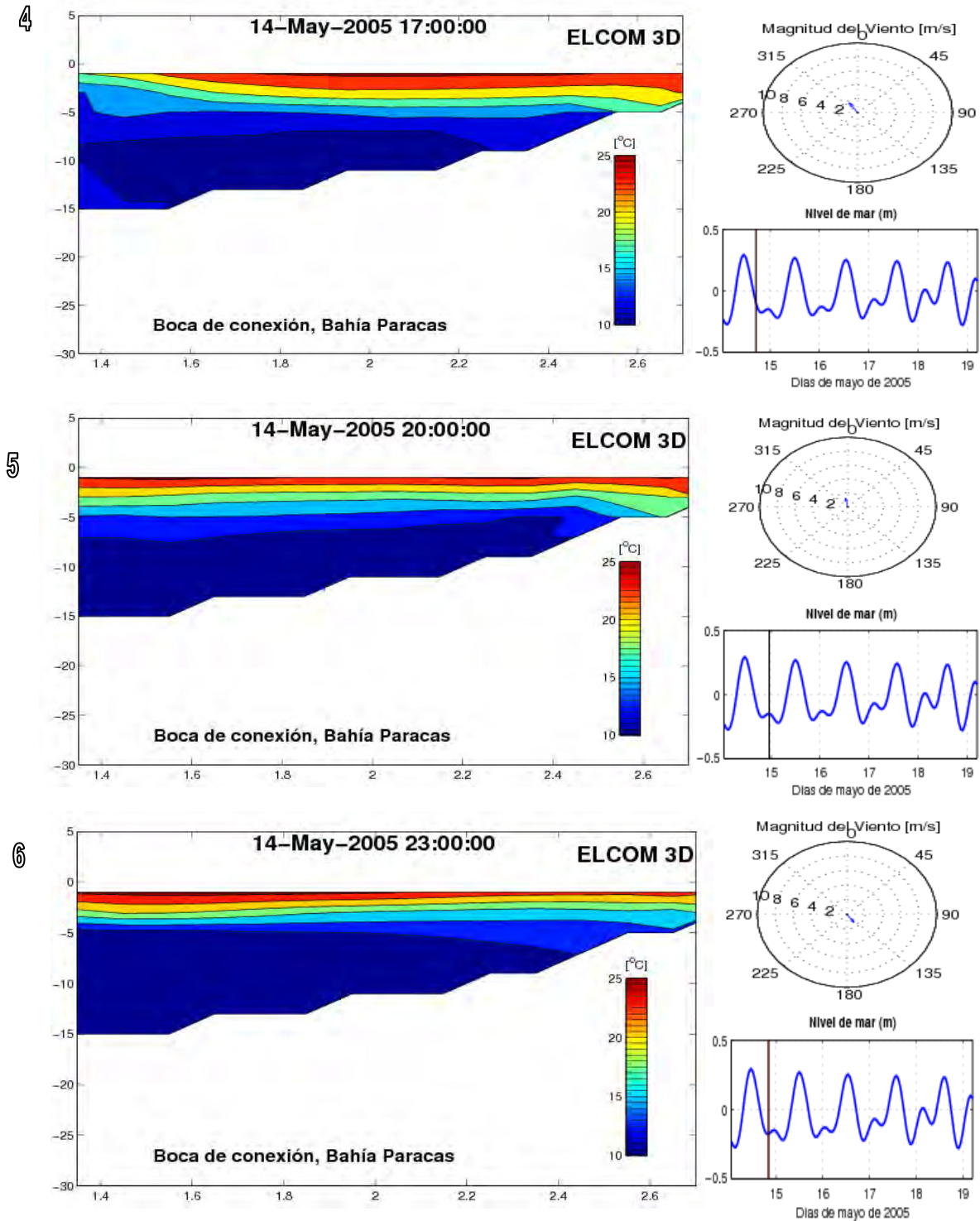


Figura 4.2. Distribución vertical de la temperatura boca de conexión) entre las 06:00 14 May 2005 y las 13:00 14 May 2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura



**Figura 4.3. Distribución vertical de la temperatura (boca de conexión) entre las 17:00 14 May 2005 y las 23:00 14 May 2005**

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

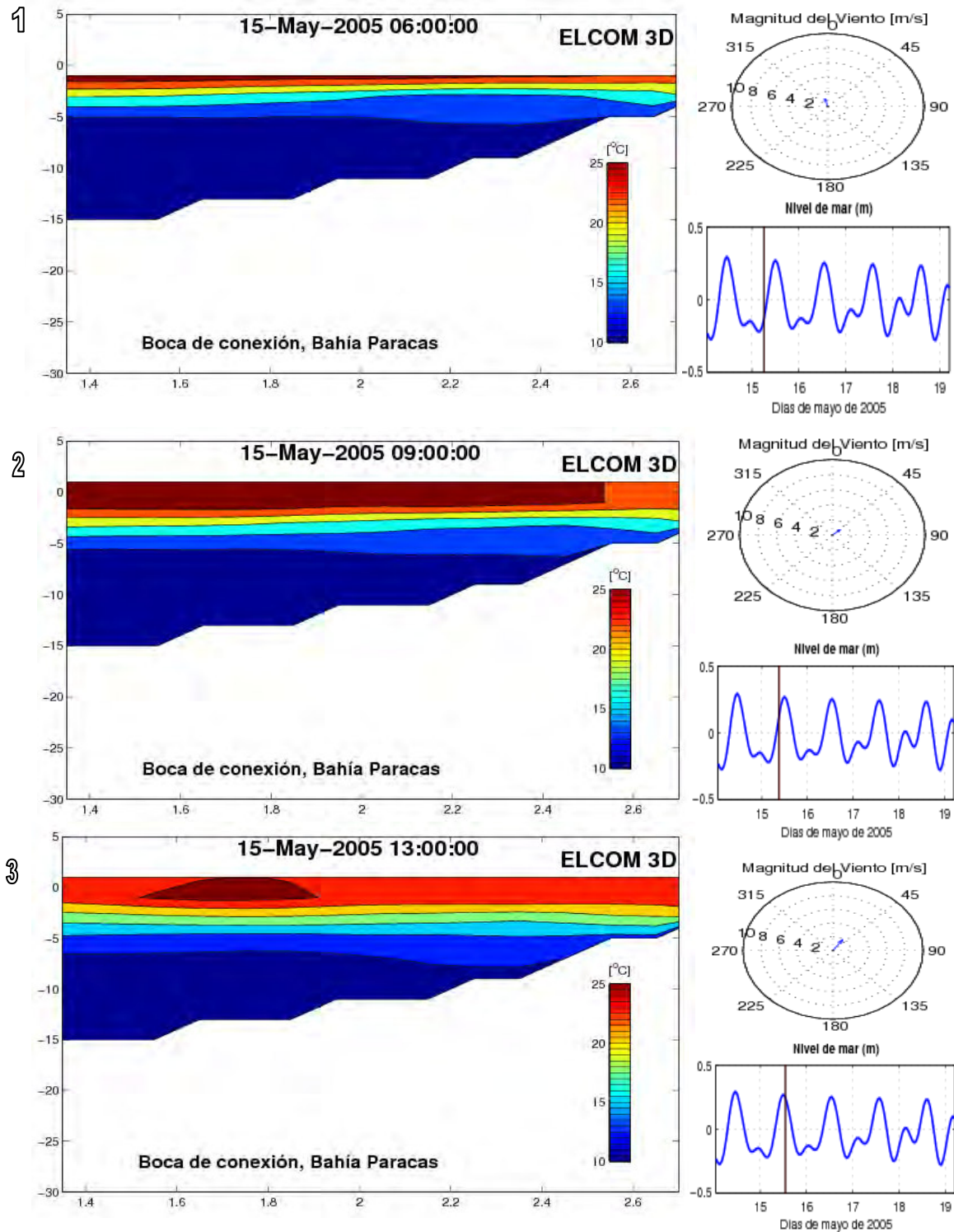
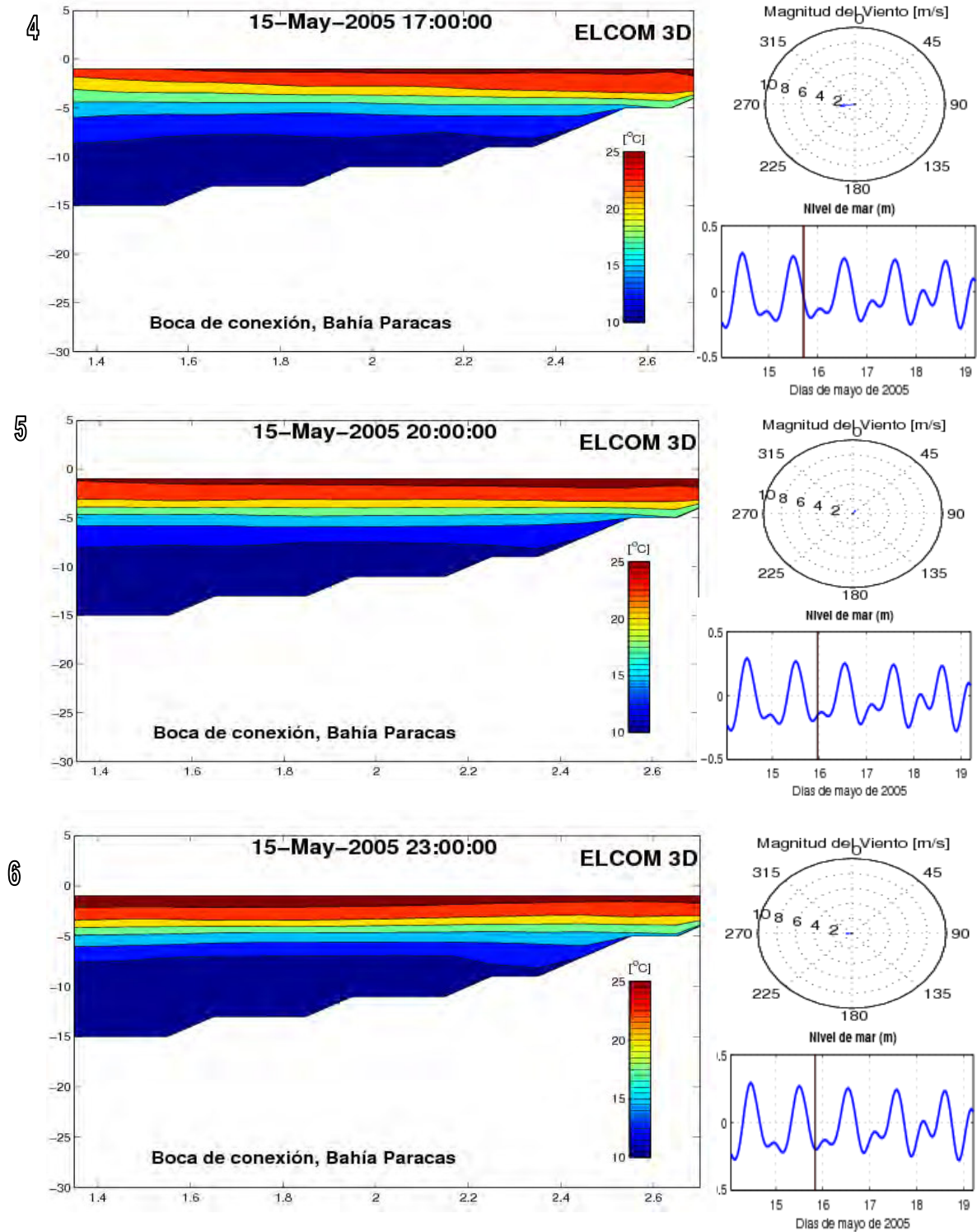


Figura 4.4. Distribución vertical de la temperatura (boca de conexión) entre las 06:00 15 May-2005 y las 13:00 15 May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura



**Figura 4.5. Distribución vertical de la temperatura (boca de conexión) entre las 17:00 15 May-2005 y las 23:00 15 May-2005**

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

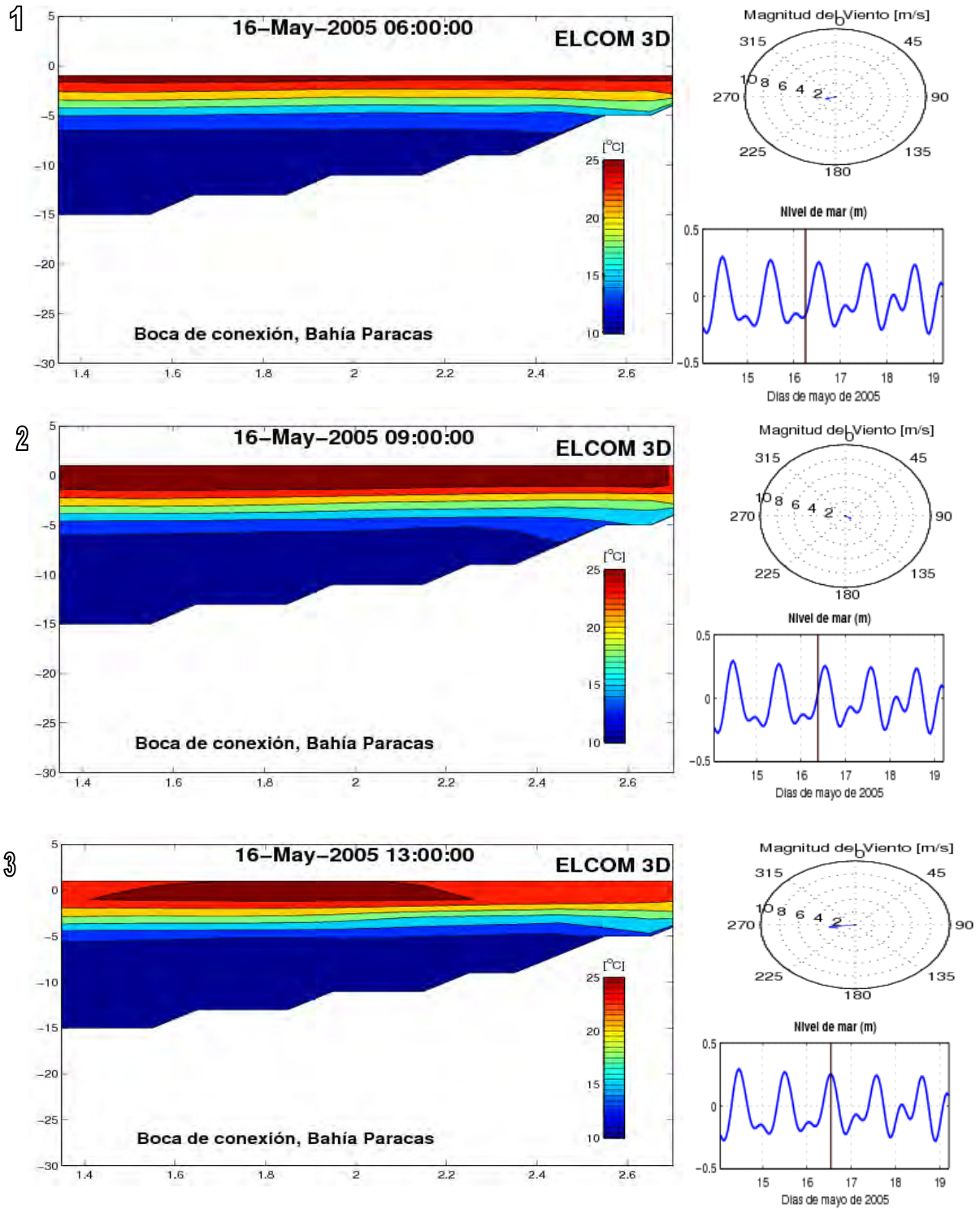
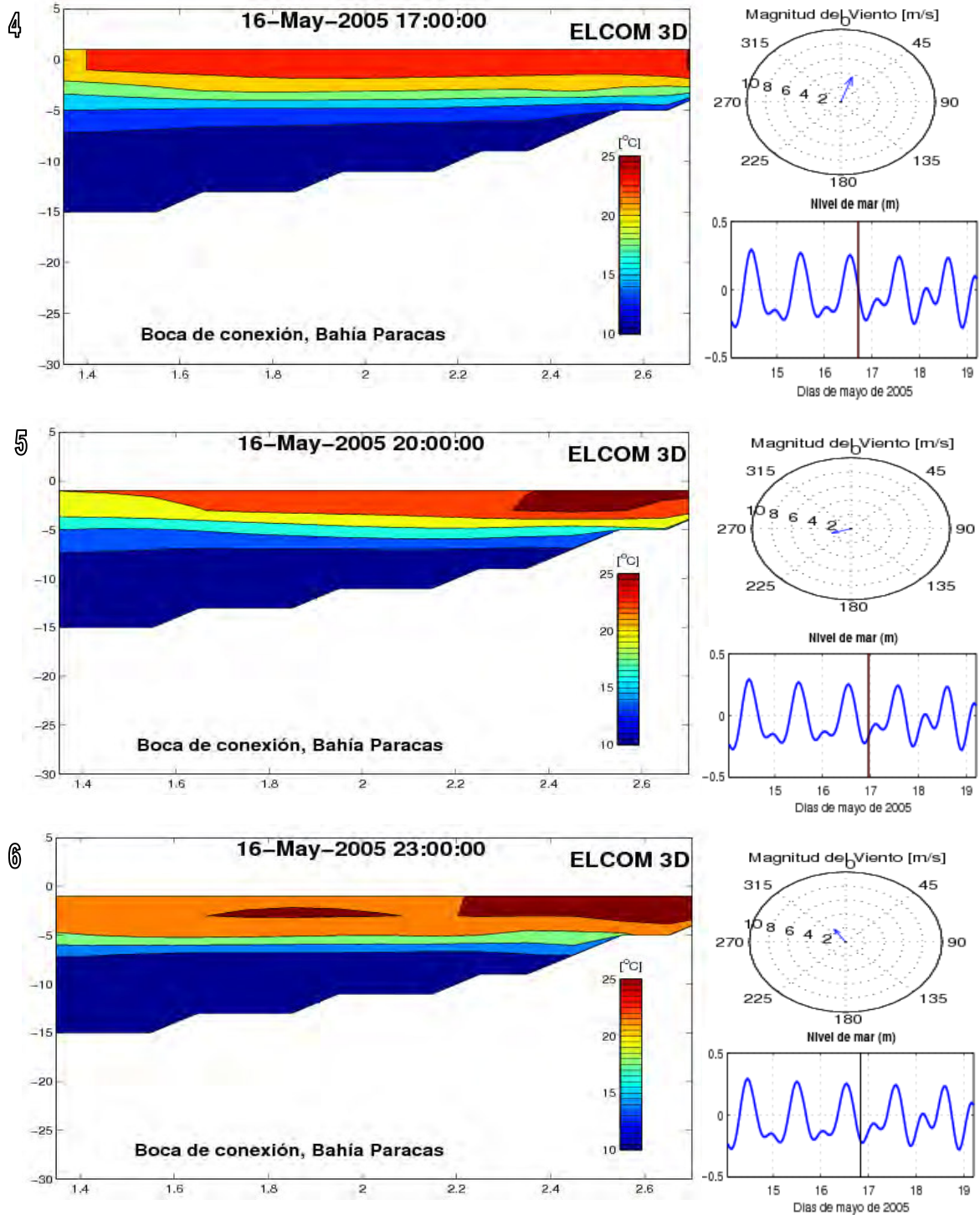


Figura 4.6. Distribución vertical de la temperatura boca de conexión) entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura



**Figura 4.7. Distribución vertical de la temperatura (boca de conexión) entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005**



## **4.2. Secciones horizontales**

En esta sección se presentan resultados obtenidos con ELCOM, que incluyen: una descripción general de la circulación en la Bahía de Paracas; la variación espacio-temporal de temperatura, salinidad y densidad simulada en la Bahía. Las Figuras 4.8 a 4.25 muestran los resultados generados por ELCOM para las siguientes secciones horizontales: superficie libre, capa de fondo y promedio en la columna de agua. Se presentan resultados de las velocidades horizontales y temperatura. Cada panel contiene la velocidad en forma vectorial y sobrepuesto a éste, se presentan los contornos de la rapidez.

Las figuras de esta sección están ordenadas en paneles 1, 2, 3, 4, 5 y 6 que presentan en orden cronológico la variación diurna del sistema. Cada panel esta compuesto de tres sub-figuras, en el lado izquierdo de cada panel se presenta la distribución horizontal de las corrientes, graficadas sobre la distribución de temperatura. Una barra de color indica la escala e intervalo de la temperatura durante la simulación y una flecha en la figura indica la escala gráfica (2 cm/s) para el campo de velocidad. En el lado derecho se presenta dos sub-figuras, en la parte superior se muestra un “compás” de viento (magnitud y dirección) y en la parte inferior el nivel del mar. Cada panel muestra la fecha y hora, así como un indicador en cada sub-figura que señala en que estado de marea y viento se encontraba el sistema durante la simulación.

### **4.2.1. Velocidades**

En las Figuras 4.8 a 4.13 se presenta la circulación general mediante la distribución de velocidades en la superficie libre de la Bahía de Paracas simulada con ELCOM, durante la campaña de mayo del 2005. Durante esta simulación el viento fue moderado ( $< 3$  m/s), incrementándose en 1 m/s el 16-May-2006 a las 17:00 hrs.

El esfuerzo del viento fue débil presentando una variabilidad (0 - 4 m/s), en especial cuando la velocidad aumentó a 4 m/s (ver Figura 4.13 panel 1), generando corrientes máximas de 5 cm/s.

El efecto de la entrada de flujo fue apreciable en la parte Oeste frente a Punta Pejerrey (ver Figura 4.8 panel 1), mientras que el efecto del reflujo fue notorio frente a la Puntilla (ver Figura 4.11 panel 1). El campo de velocidad presentó ondulaciones en las zonas cercanas a la frontera abierta; estas ondulaciones pueden ser manifestaciones de inestabilidades locales del modelo o a un efecto de conservación de volumen y se presentan como ondas artificiales (numéricas).

La Figura 4.8 presenta la variación diurna de la temperatura y de la distribución superficial de velocidad en la Bahía de Paracas. Durante las primeras 12 horas de simulación (ver paneles 1, 2 y 3 (pleamar y bajamar)), la temperatura superficial presentó una variabilidad entre 21.5°C y 18.5°C, y homogénea en toda la bahía. El resto del día, ver Figura 4.9 paneles 4, 5, y 6 (bajamar), la temperatura disminuyó a 18°C, ingresando esta masa de agua a la Bahía. Las velocidades superficiales alcanzaron valores máximos (3 cm/s) en las zonas de la boca y Norte, durante la bajamar y pleamar (paneles 3 y 5). Durante los estados de reposo de la marea, las velocidades superficiales fueron mínimas (1 cm/s).

La disminución de 2.5°C en la temperatura superficial, entre la mañana y la tarde, coincidió con la pleamar, por lo que seguramente el enfriamiento fue causado por agua fría de la zona Sur adyacente que entró a la Bahía por efecto de la pleamar. La boca de conexión es una zona que por su morfología y constricción se vuelve más dinámica, lo que explica claramente el incremento en la magnitud de las velocidades superficiales. Sin embargo, la zona Norte es la zona más alejada de la boca de conexión, por lo que el único factor que podría explicar el incremento en las velocidades en esa zona, es el viento, el mismo que alcanzó su valor máximo asociado a esos incrementos de velocidad en la zona Norte. La zona Norte pegada a la costa es la más somera de toda la

Bahía, con profundidades de 5 m, lo que también podría explicar la dinámica diferente al resto de la Bahía.

Las Figuras 4.14 panel 1 a 4.16 panel 2, muestran la variación de la temperatura y de la distribución de velocidad en el fondo de la Bahía. La temperatura de fondo disminuyó de 21 a 18°C entre las 06:00 14-May-2005 y las 09:00 15-May-2005; durante este periodo de tiempo la Bahía se inundó completamente con aguas frías provenientes del Sur. Durante las siguientes bajamar y pleamar (ver Figura 4.16 panel 3 y Figura 4.17 panel 6) se presenta un flujo débil hacia fuera de la Bahía debido al ingreso de agua pegado a la costa proveniente del Norte; luego se invierte nuevamente el sistema e ingresa un flujo de agua fría proveniente del Sur a la Bahía (ver Figura 4.19 panel 6), la temperatura de 18°C se mantuvo homogénea dentro de la Bahía. Las velocidades máximas (3 cm/s) en el fondo se ubicaron en la boca, zona Norte y centro de la Bahía (ver Figura 4.18 paneles 1, 2 y 3).

Claramente la disminución de temperatura entre el panel 1 Figura 4.14 y panel 2 Figura 4.16 se debe a la entrada de agua de diferente temperatura proveniente del Sur durante la pleamar. Las zonas de máxima velocidad seguramente se deben a la batimetría de la zona, ya que se ubican en la boca de conexión con la bahía. El incremento de las corrientes en la zona Norte podría estar relacionado con el incremento de magnitud del viento, el mismo que podría afectar toda la columna de agua en esa zona poco profunda (< 10 m).

El promedio en la vertical proporciona una idea general de los patrones de circulación en la Bahía. La Figura 4.20 paneles 1, 2 y 3 muestra las corrientes durante la pleamar entre las 06:00 y 13:00 14-May-2005. Al comienzo de la pleamar, la simulación (ver panel 1) se observó un flujo hacia el interior de la Bahía por el centro del canal de acceso de 1 cm/s incrementándose a las 13:00 14-May-2005 panel 3 (ver Figura 4.20). Se apreciaron tres sistemas de remolinos ciclónicos, uno frente a Punta Pejerrey (panel 2 Figura 4.2), parte

central de la Bahía (panel 5 Figura 4.23) y otro en la boca de conexión (panel 3 Figura 4.24).

Este remolino permaneció durante la bajamar, aunque con menor intensidad, mientras que el primero desapareció durante la pleamar.

Hubo dos periodos en los que las aguas estuvieron casi en reposo con velocidades lentas (0 -1 cm/s) dentro de la Bahía, a las 13:00 14-May-2005 y a las 23:00 15-May-2005, y coincidieron con el valle y la cresta de la onda de marea. Durante la pleamar se generaron remolinos pequeños frente a Punta Pejerrey (ver panel 4 Figura 4.24) y en la parte central de la Bahía que no superaron los 3 cm/s.

El patrón de circulación durante pleamares y bajamares se muestra en la Figura 4.20 panel 1 a las 06:00 14-May-2005; a las 17:00 May-2005 (ver Figura 4.25 panel 4) las corrientes fueron mínimas, con un flujo que ingresa a la Bahía por el canal de acceso. A las 06:00 14-May-2005 (ver panel 1 Figura 4.20) la pleamar provocó un importante flujo que ocupó toda la extensión de la Bahía. Por otro lado, se presentaron flujos que afectaron la zona norte de conexión y boca de acceso con velocidades entre 3 cm/s y 5 cm/s (ver panel 1, 2, 3 Figura 4.24).

Parte de este flujo se desvió a la derecha e ingreso a la Bahía, con una corriente de 2 cm/s. La otra parte se desvió a la izquierda y generó un remolino pequeño cerca de Punta Pejerrey (ver panel 5 Figura 4.23); el flujo se alineó a la dirección y configuración de la Bahía. Toda la región norte de la Bahía presentó en promedio velocidades entre 3 y 5 cm/s y la región dentro de la Bahía velocidades entre 1 y 3 cm/s. Los remolinos que se observan en las Figuras 4.24 y 4.25 se forman por interacción de las corrientes, la topografía, fricción de fondo y la fuerza del viento, debido a la irregularidad en la boca de conexión y la parte Norte donde se presenta la parte más profunda pero de la Bahía y las corrientes observadas en la parte Norte se deben a las condiciones de frontera.

Se puede asumir que estos remolinos pueden influir en el transporte de contaminantes en la Bahía así como en la zona donde la circulación es mínima y la ventilación es deficiente, donde se puede presentar anoxia que es característico en la Bahía de Paracas, por lo que será objeto de un estudio posterior más detallado. Las velocidades encontradas se asemejan a los resultados de mediciones observadas en la Bahía. Estas similitudes proveen evidencia de que el modelo es capaz de reproducir las condiciones dinámicas de la Bahía de Paracas.

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

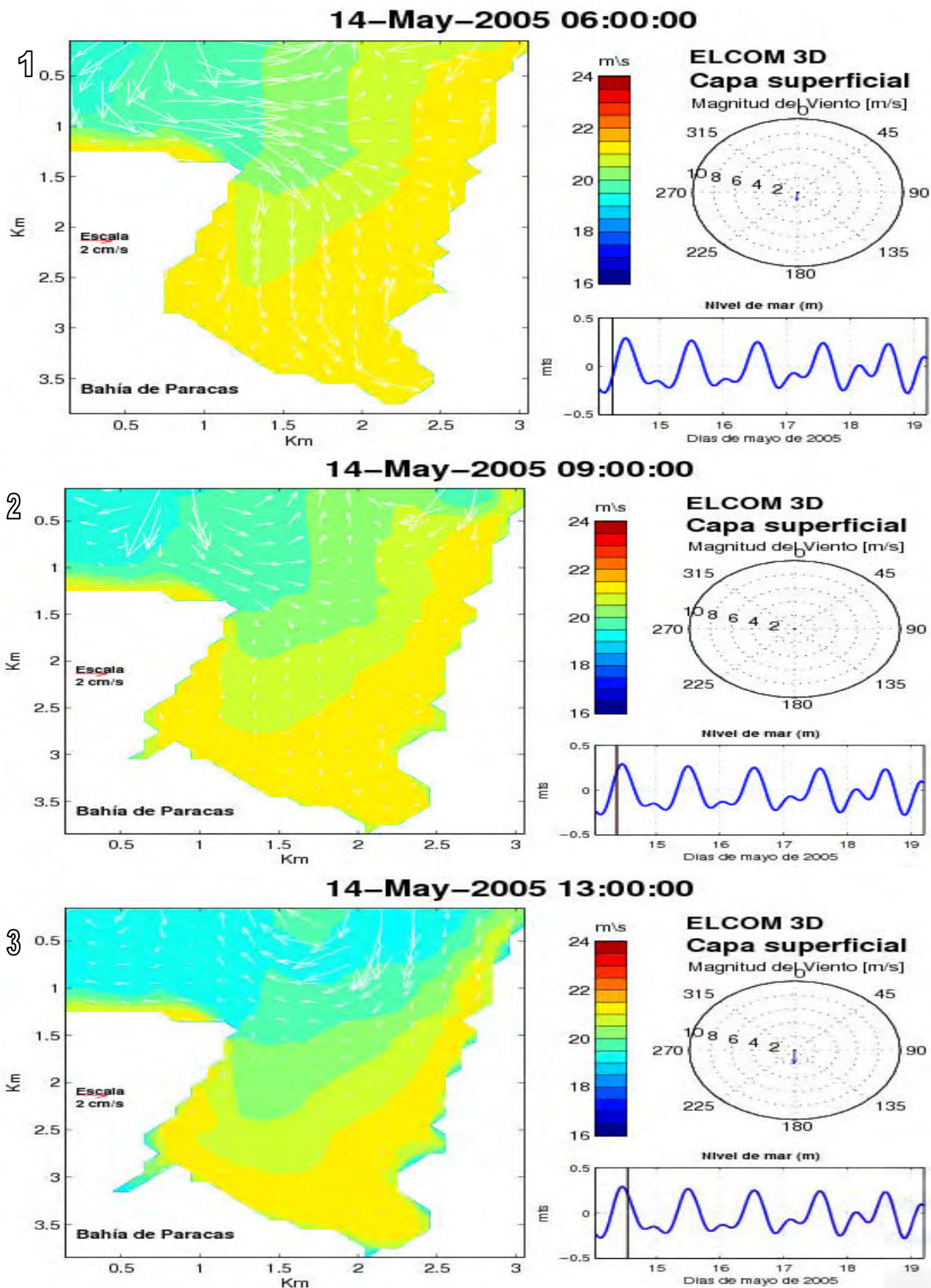
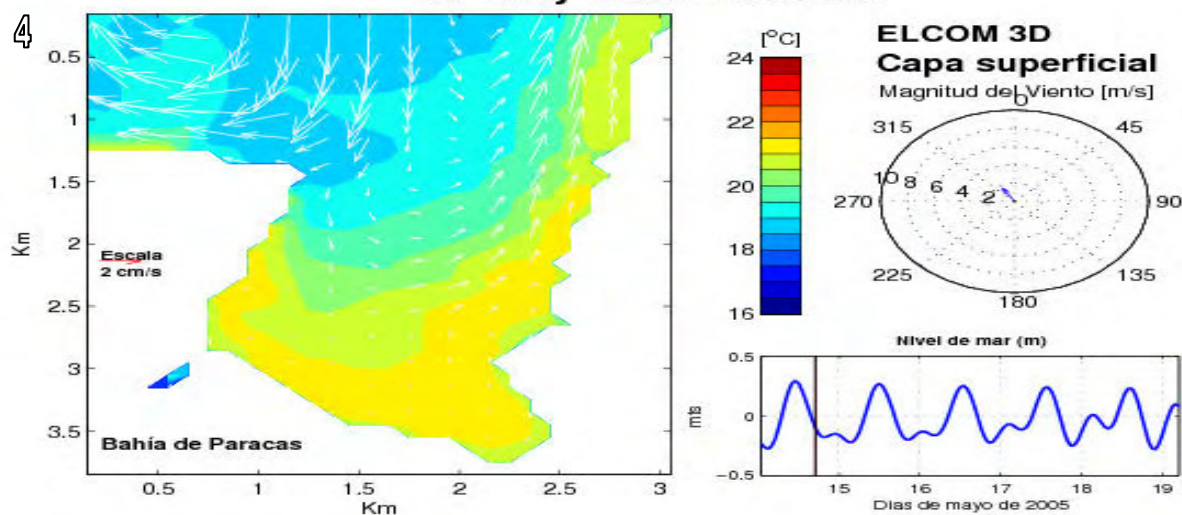


Figura 4.8: Distribución de velocidad y temperatura superficial entre las 06:00 14-May-2005 y las 13:00 14-May-2005

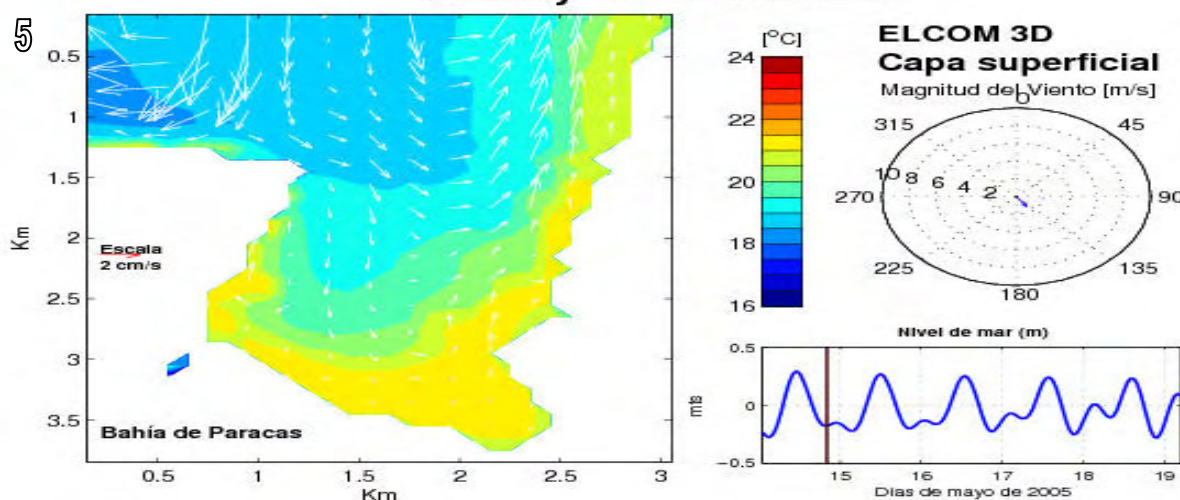


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D Velocidad

14-May-2005 17:00:00



14-May-2005 20:00:00



14-May-2005 23:00:00

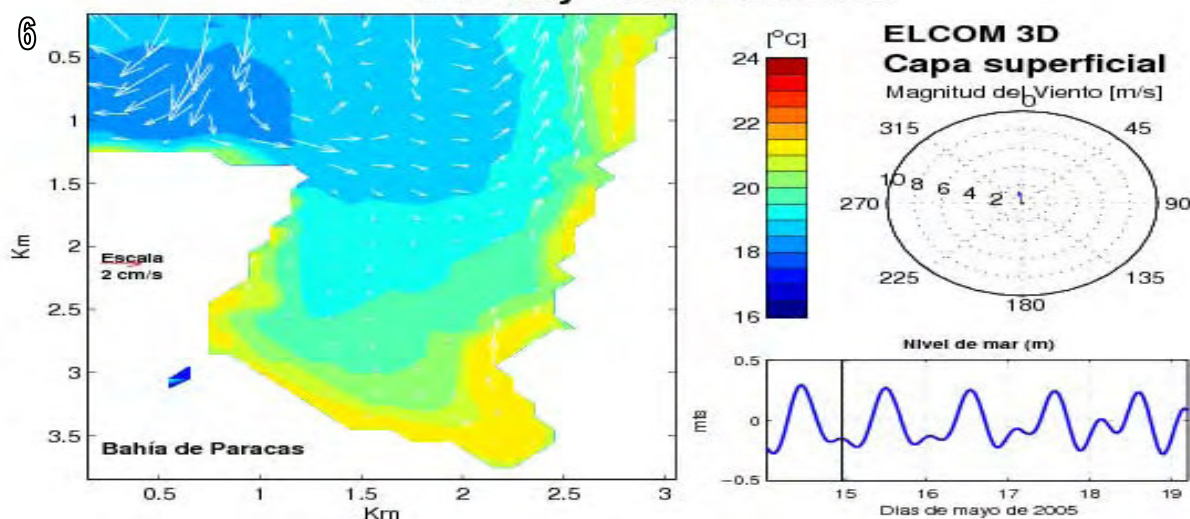
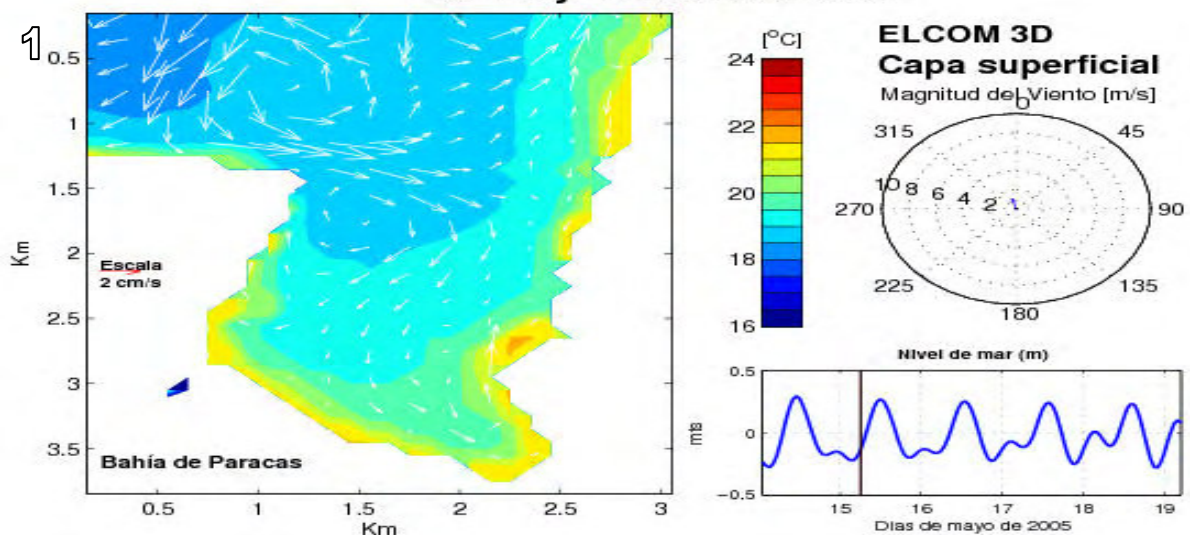


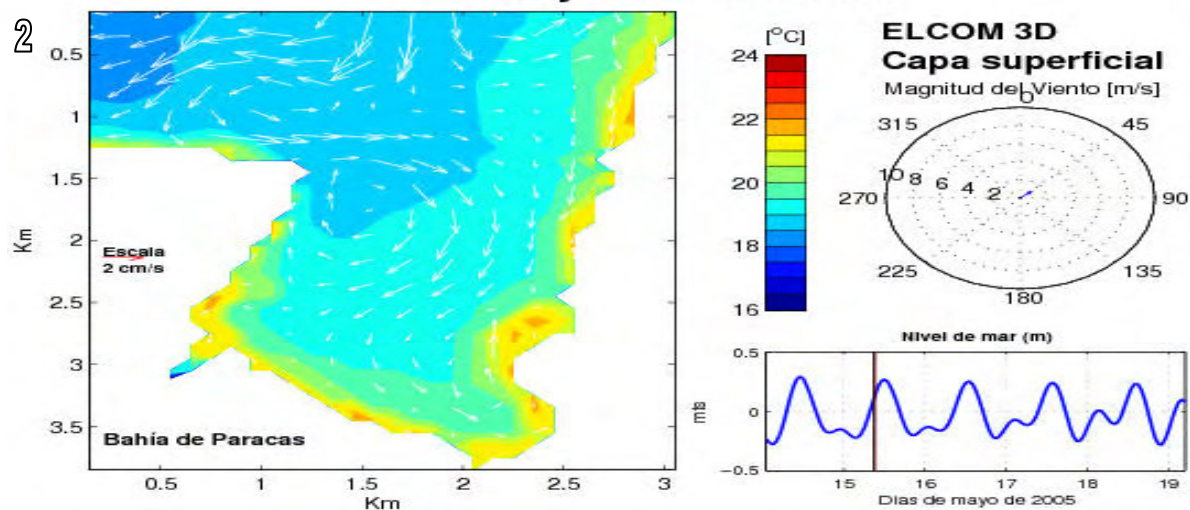
Figura 4.9: Distribución de velocidad y temperatura superficial entre las 17:00 14-May-2005 y las 23:00 14-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

15-May-2005 06:00:00



15-May-2005 09:00:00



15-May-2005 13:00:00

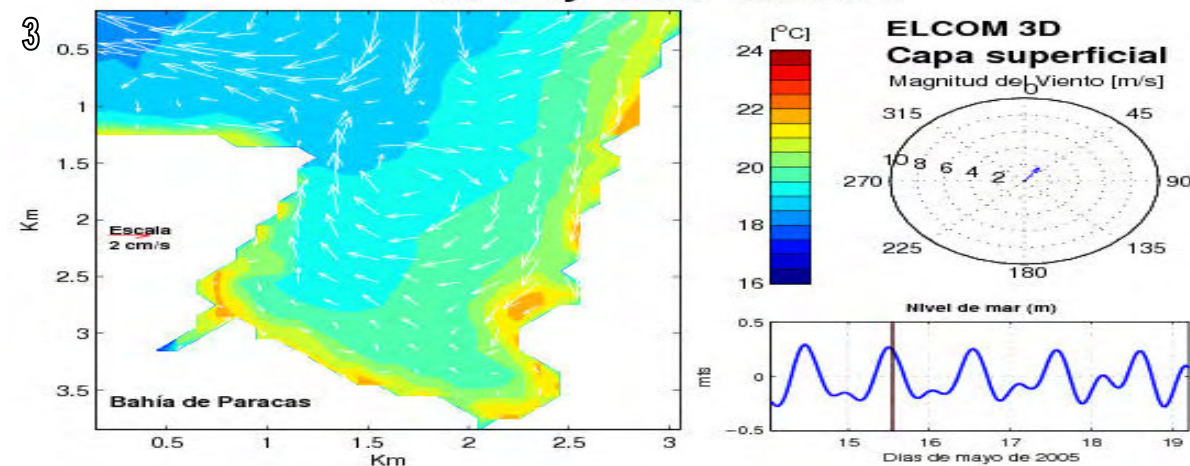
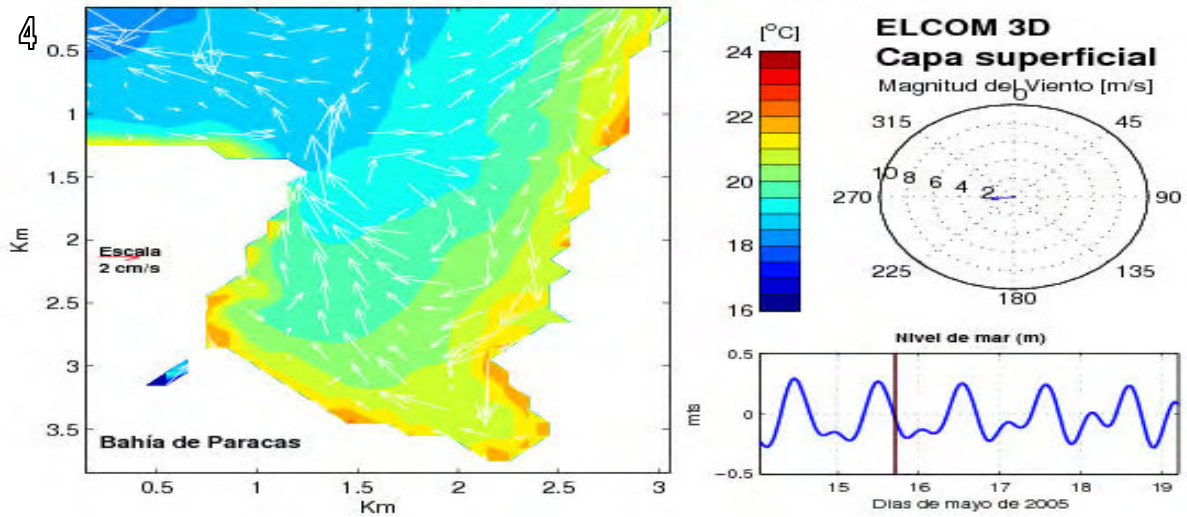


Figura 4.10: Distribución de velocidad y temperatura superficial entre las 06:00 15-May-2005 y las 13:00 15-May-2005

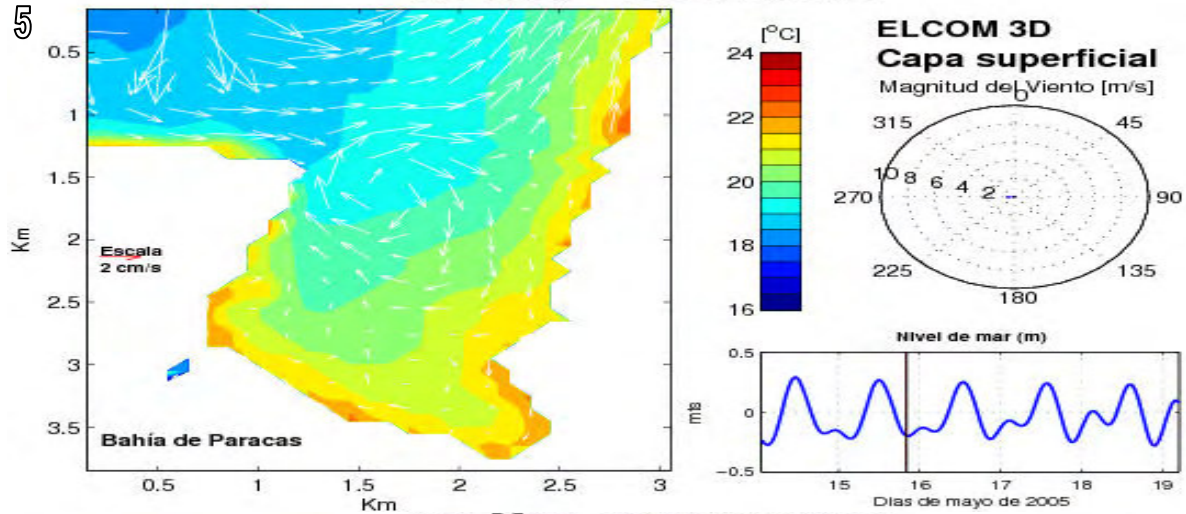


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

15-May-2005 17:00:00



15-May-2005 20:00:00



15-May-2005 23:00:00

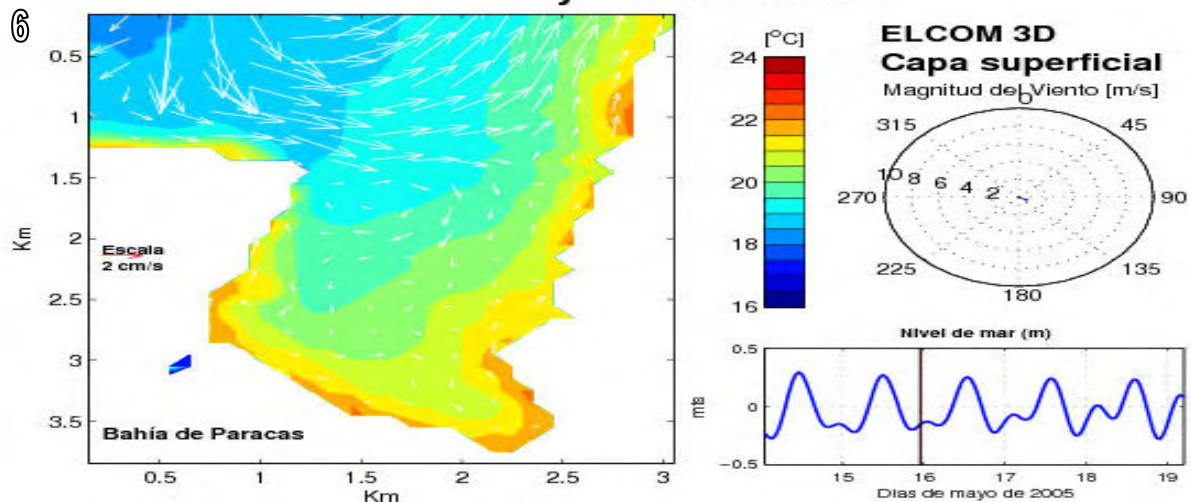


Figura 4.11: Distribución de velocidad y temperatura superficial entre las 17:00 15-May-2005 y las 23:00 15-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

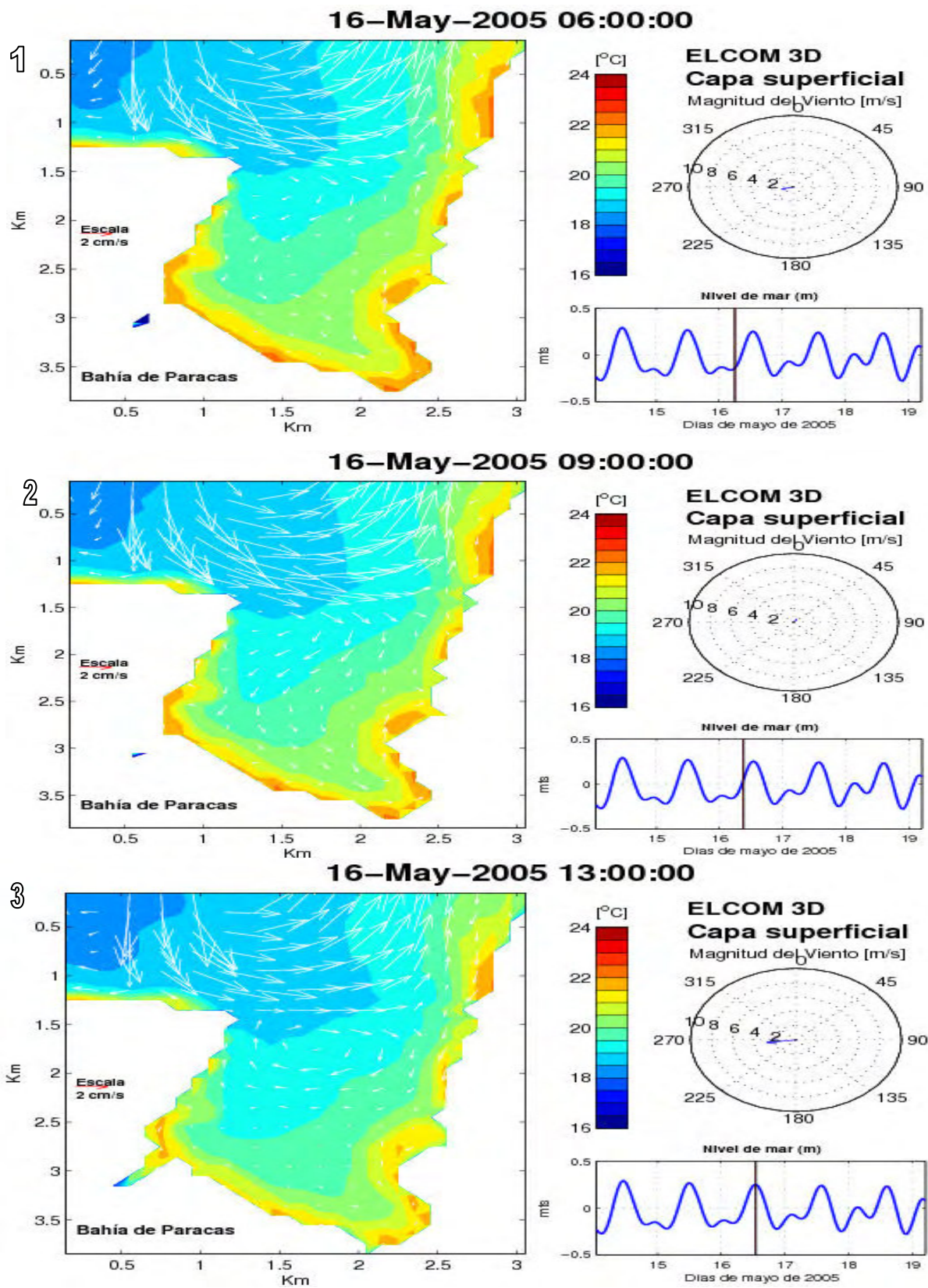


Figura 4.12: Distribución de velocidad y temperatura superficial entre las 06:00 16-May-2005 y las 13:00 16-May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

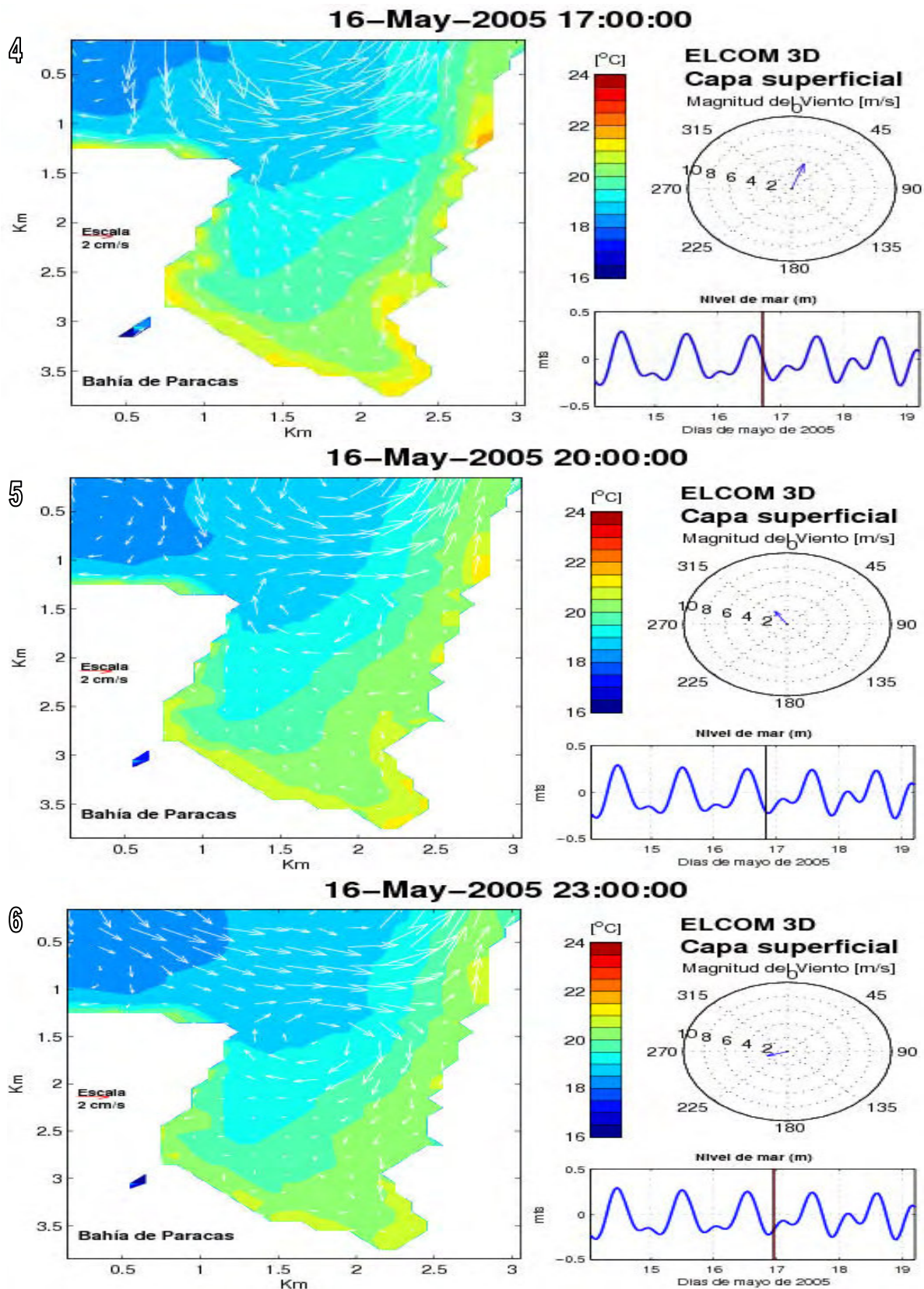


Figura 4.13: Distribución de velocidad y temperatura superficial entre las 17:00 16-May-2005 y las 23:00 16-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

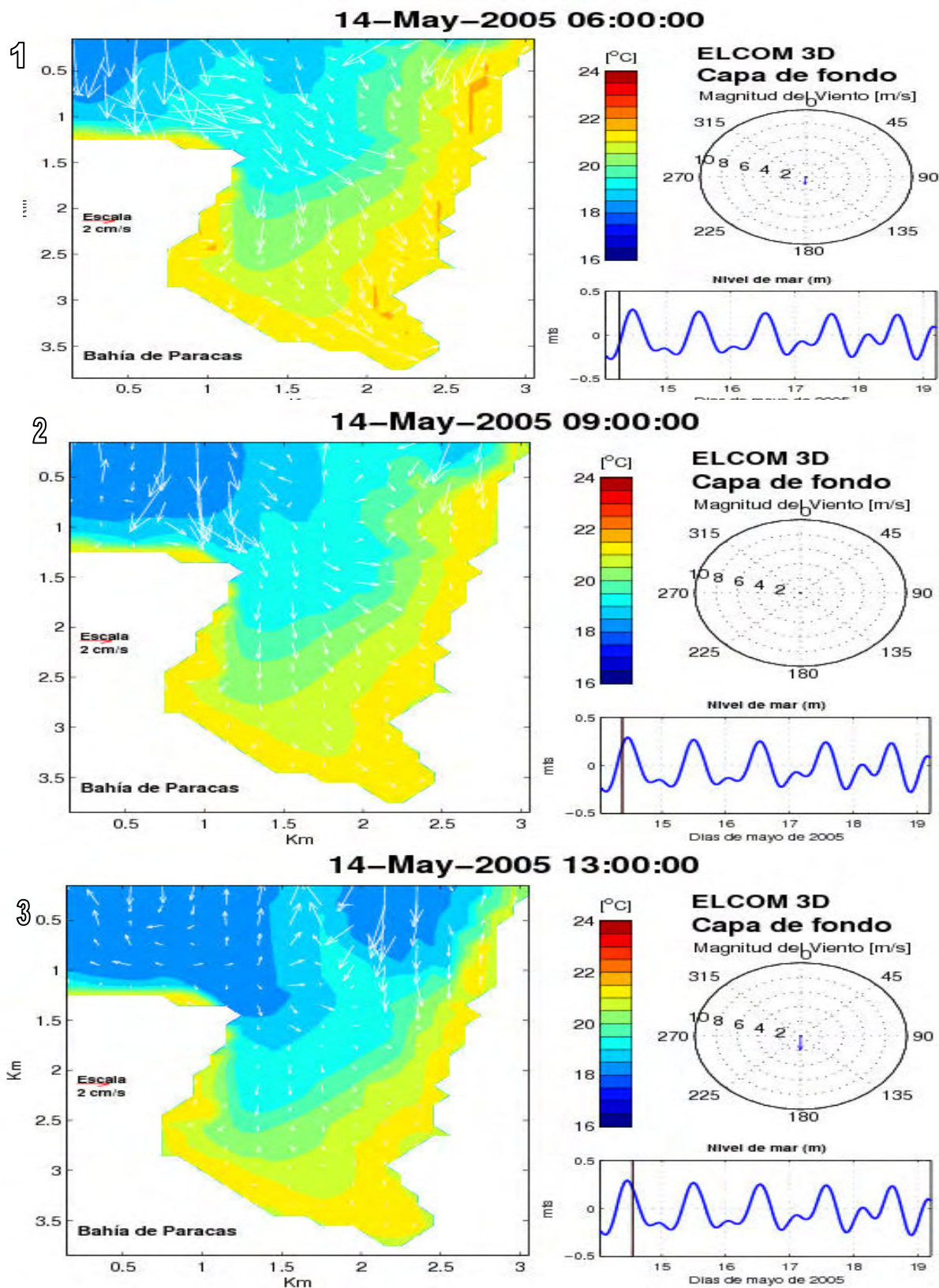


Figura 4.14: Distribución de velocidad y temperatura en la capa de fondo entre las 06:00 14-May-2005 y las 13:00 14-May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

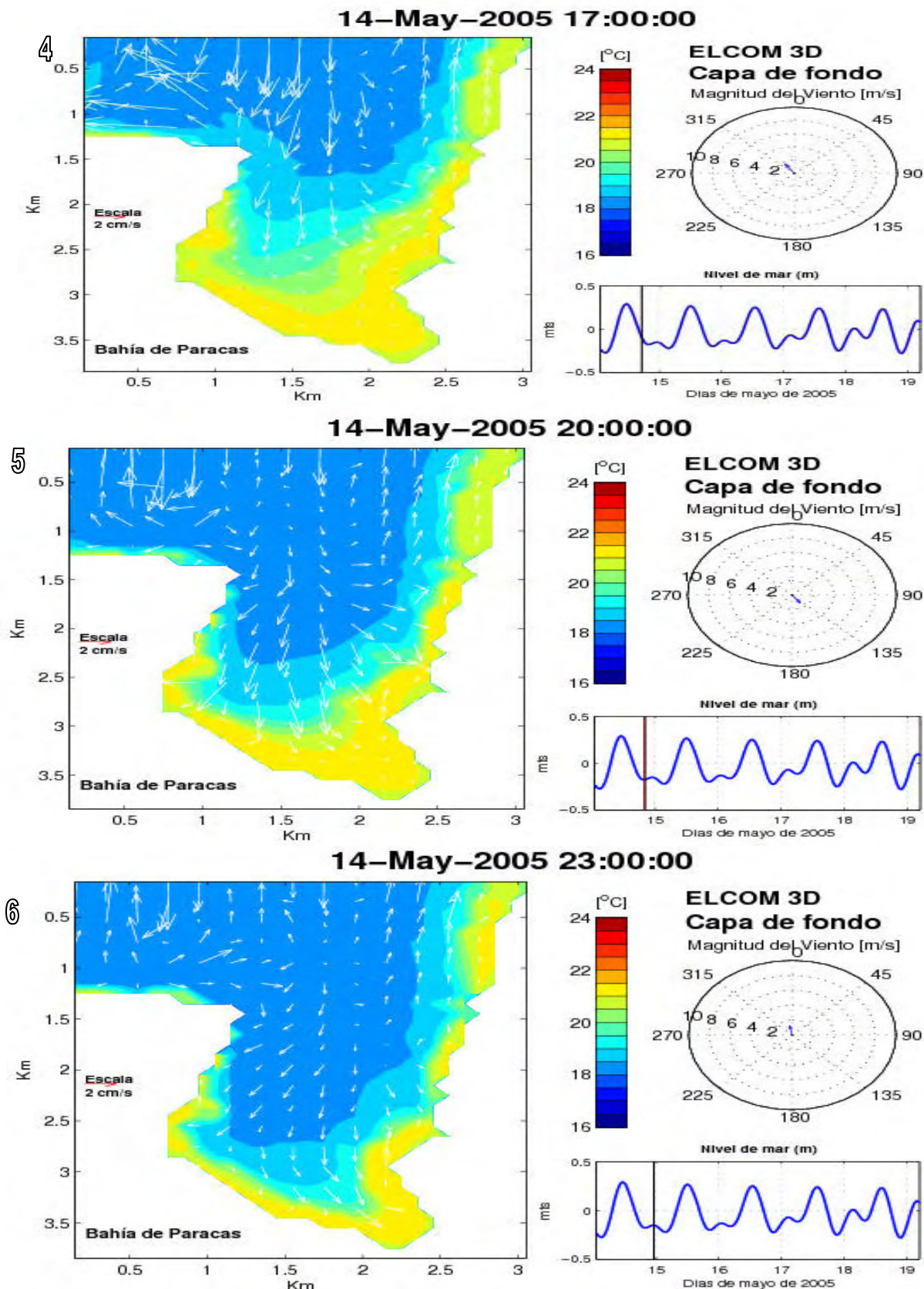


Figura 4.15: Distribución de velocidad y temperatura capa de fondo entre las 17:00 14-May-2005 y las 23:00 14-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

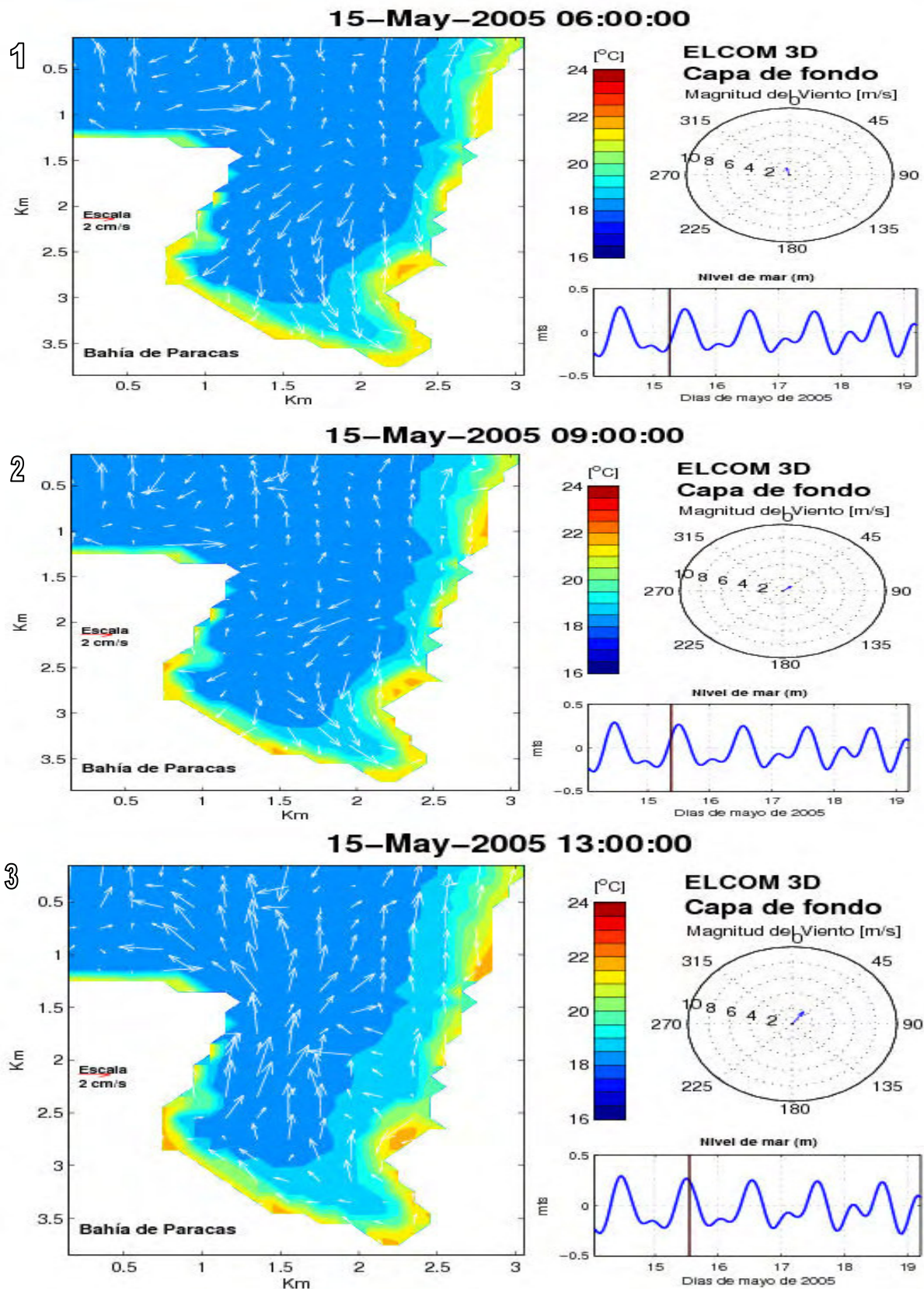


Figura 4.16: Distribución de velocidad y temperatura en la capa de fondo entre las 06:00 15-May-2005 y las 13:00 15-May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

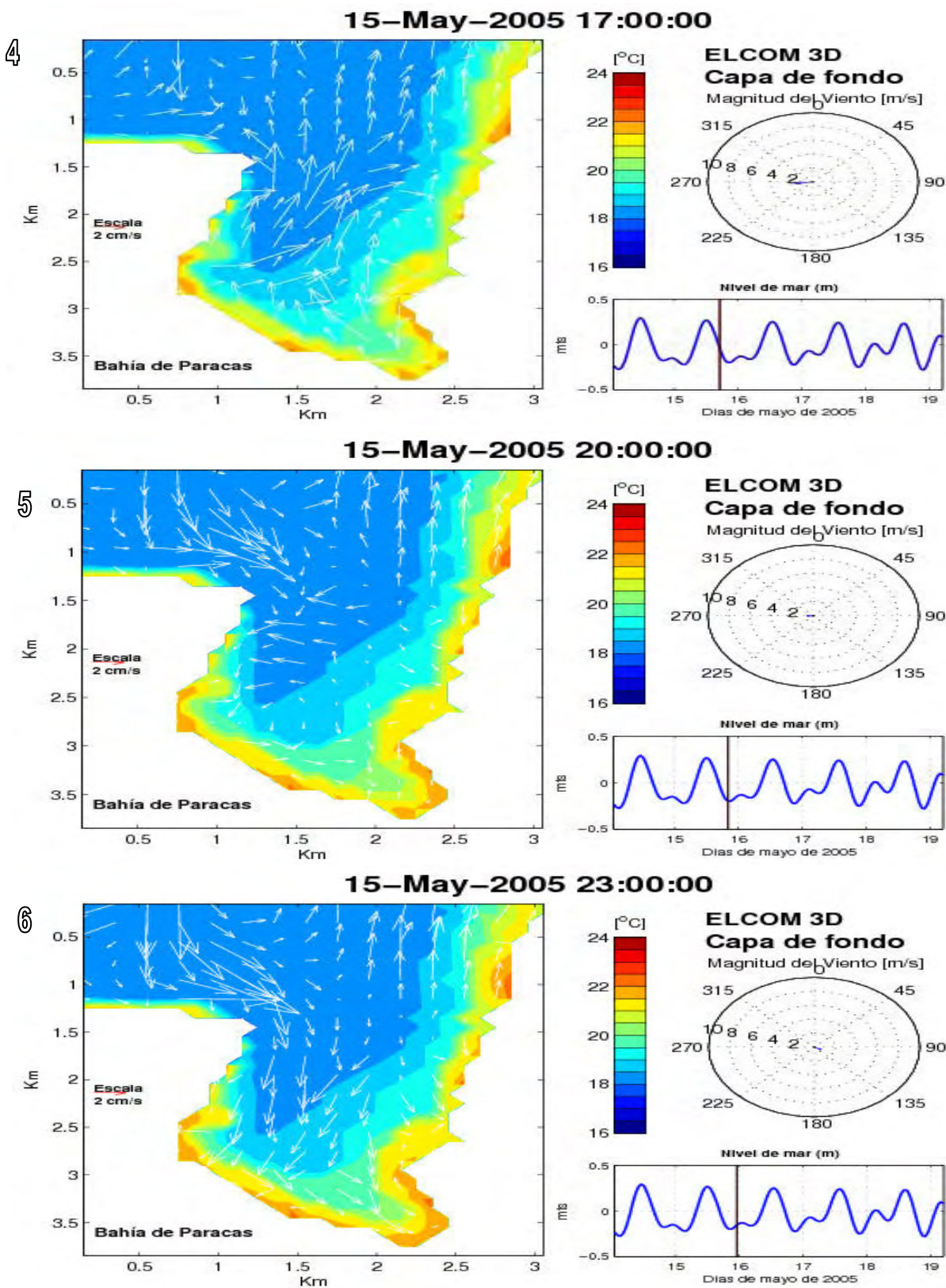


Figura 4.17: Distribución de velocidad y temperatura en la capa de fondo entre las 17:00 15-May-2005 y las 23:00 15-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

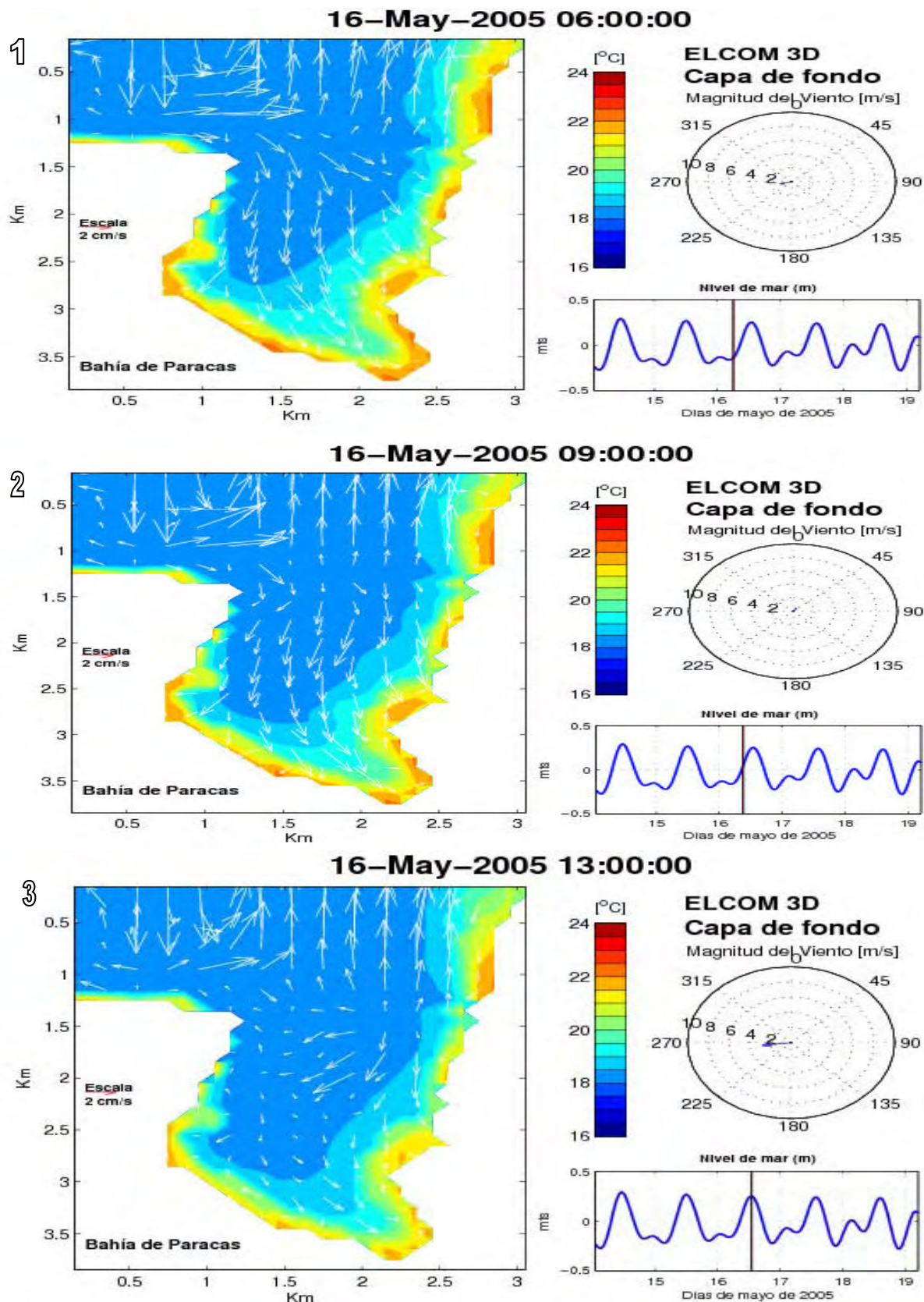
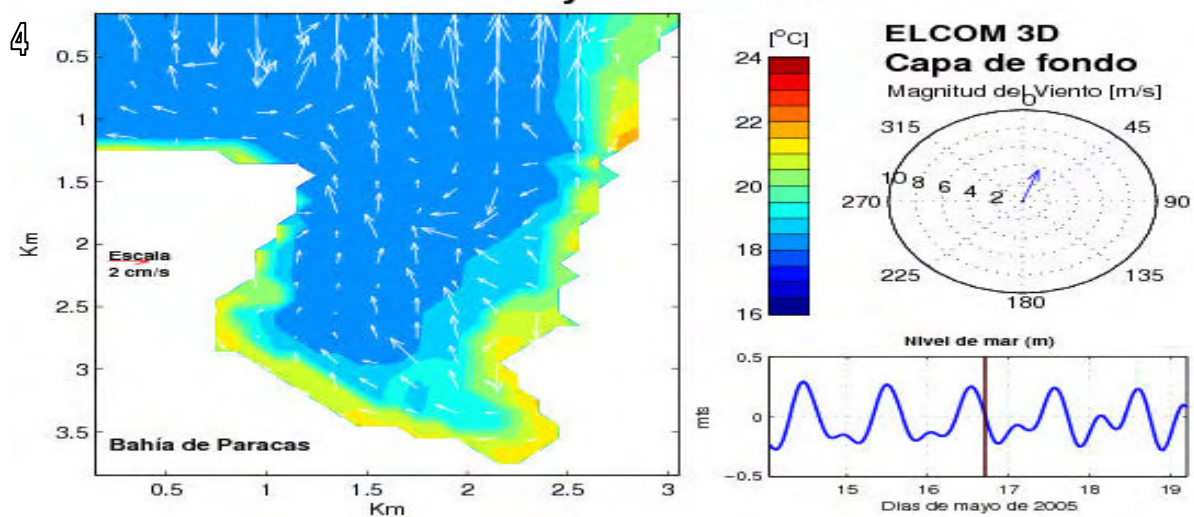


Figura 4.18: Distribución de velocidad y temperatura en la capa de fondo entre las 06:00 16-May-2005 y las 13:00 16May-2005

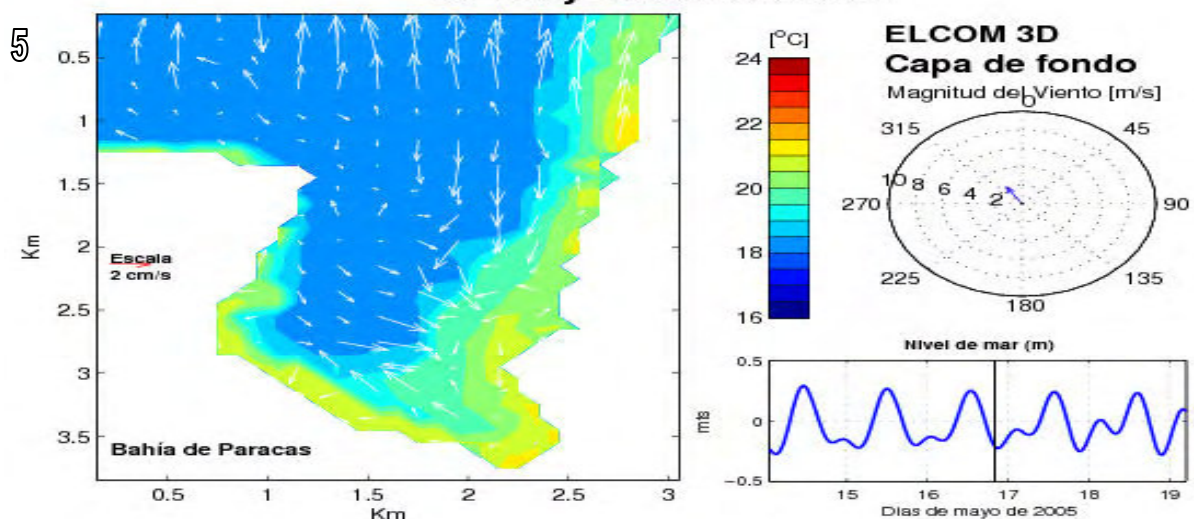


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

16-May-2005 17:00:00



16-May-2005 20:00:00



16-May-2005 23:00:00

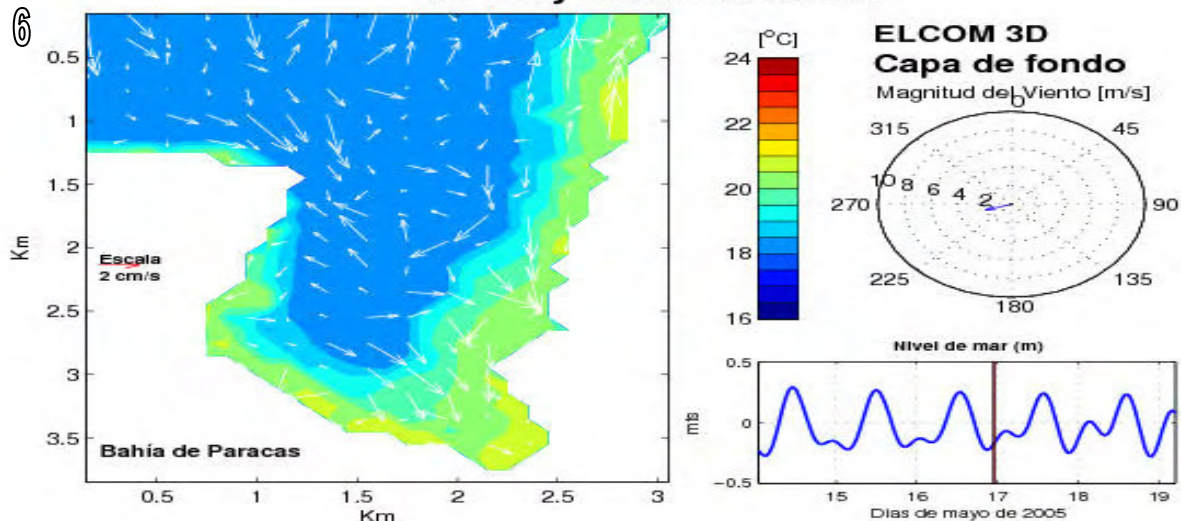


Figura 4.19: Distribución de velocidad y temperatura en la capa de fondo entre las 17:00 16-May-2005 y las 23:00 16-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

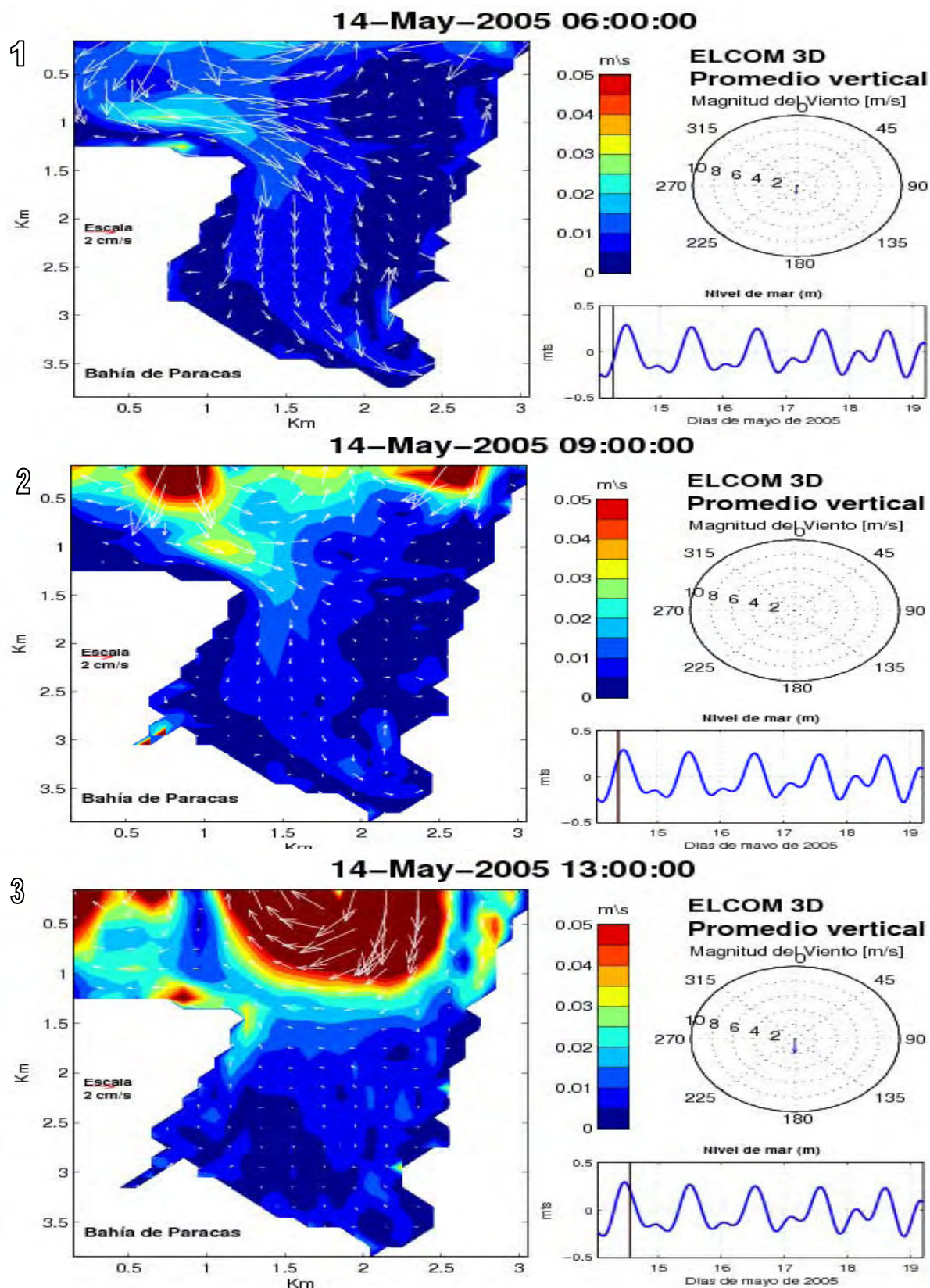
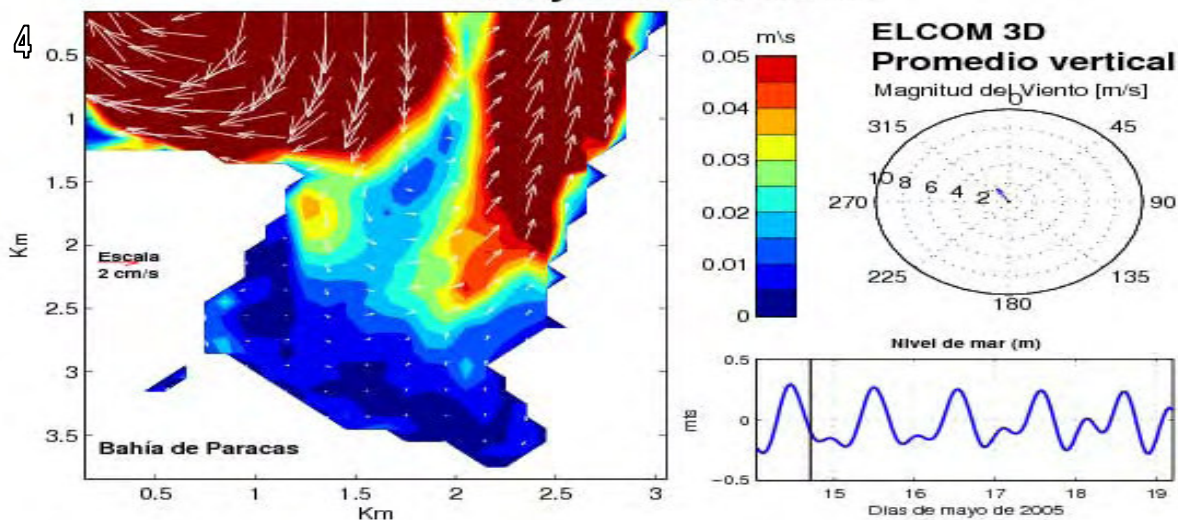


Figura 4.20: Velocidad y distribución horizontal de la rapidez entre las 06:00 14-May-2005 y las 13:00 14-May-2005

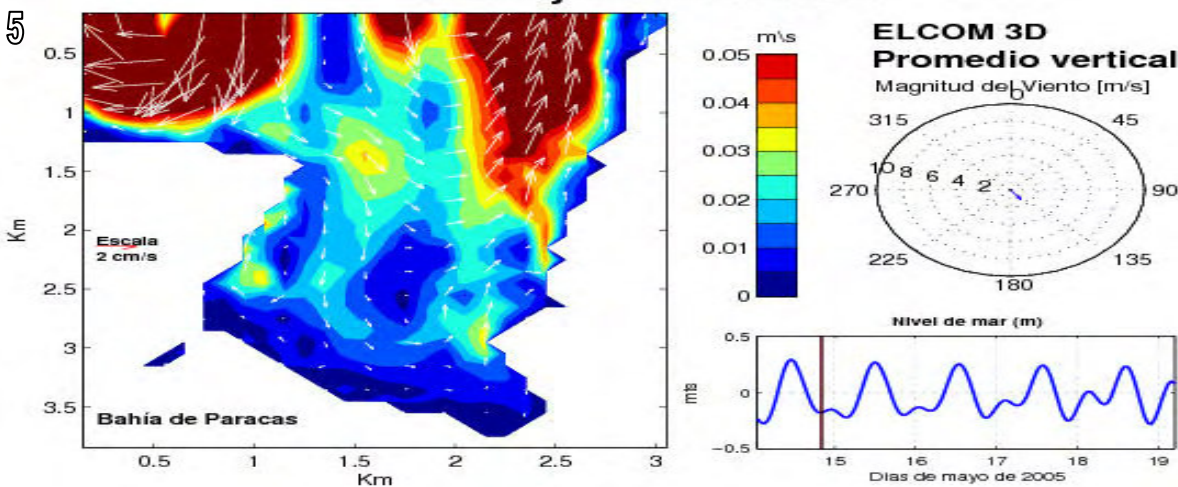


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

14-May-2005 17:00:00



14-May-2005 20:00:00



14-May-2005 23:00:00

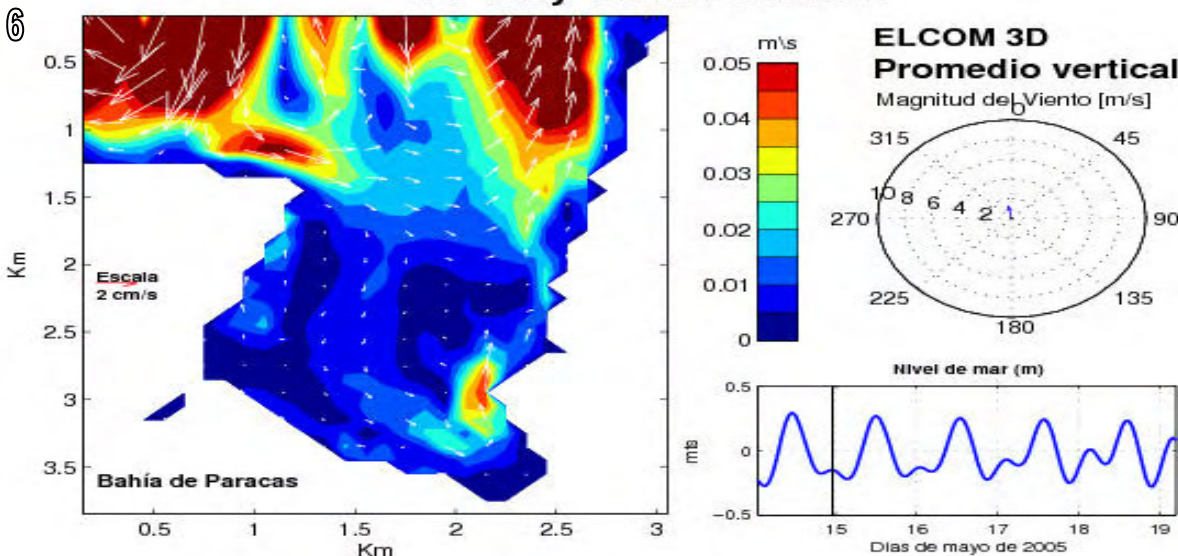


Figura 4.21: Velocidad y distribución horizontal de la rapidez entre las 17:00 14-May-2005 y las 23:00 14-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

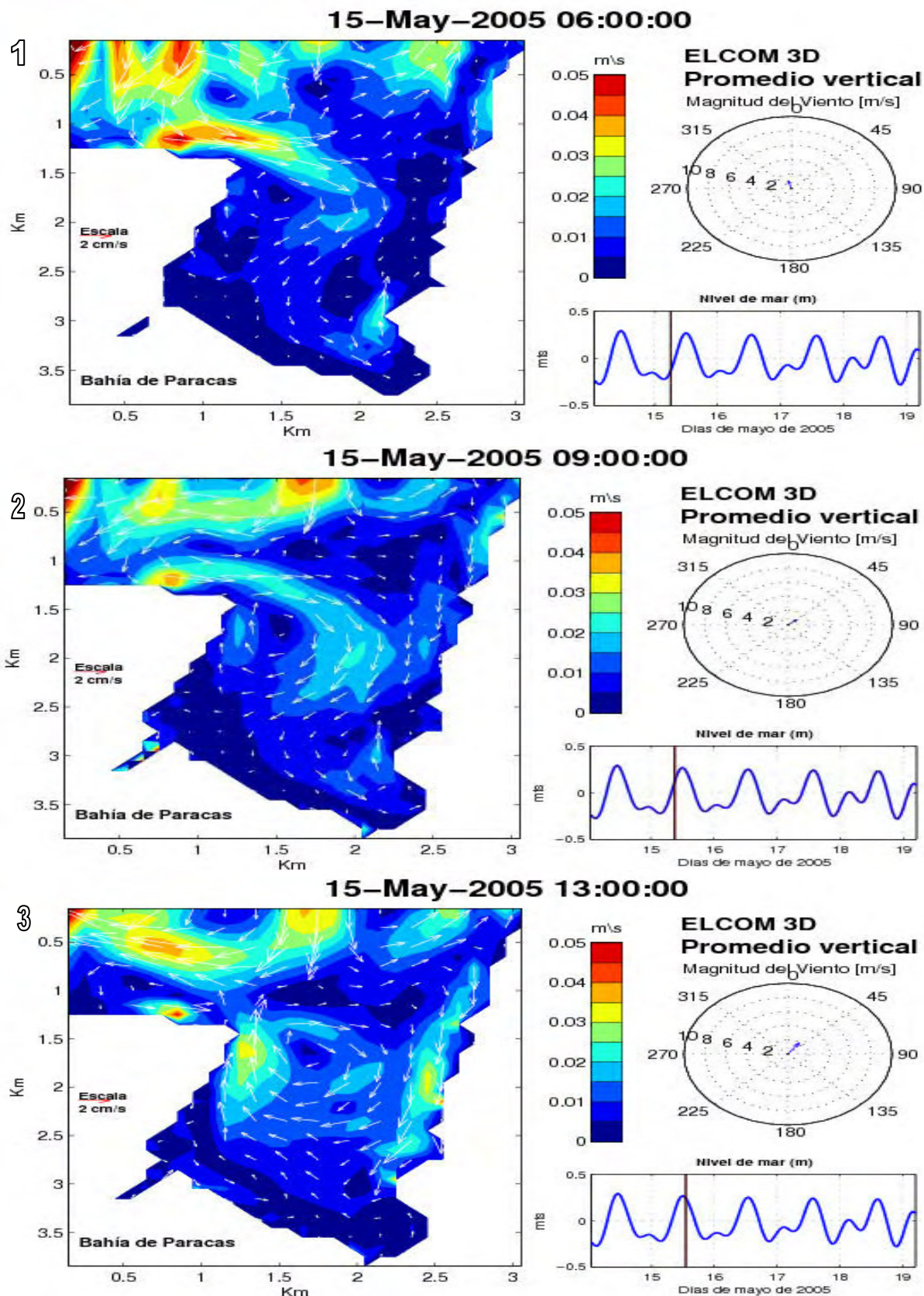
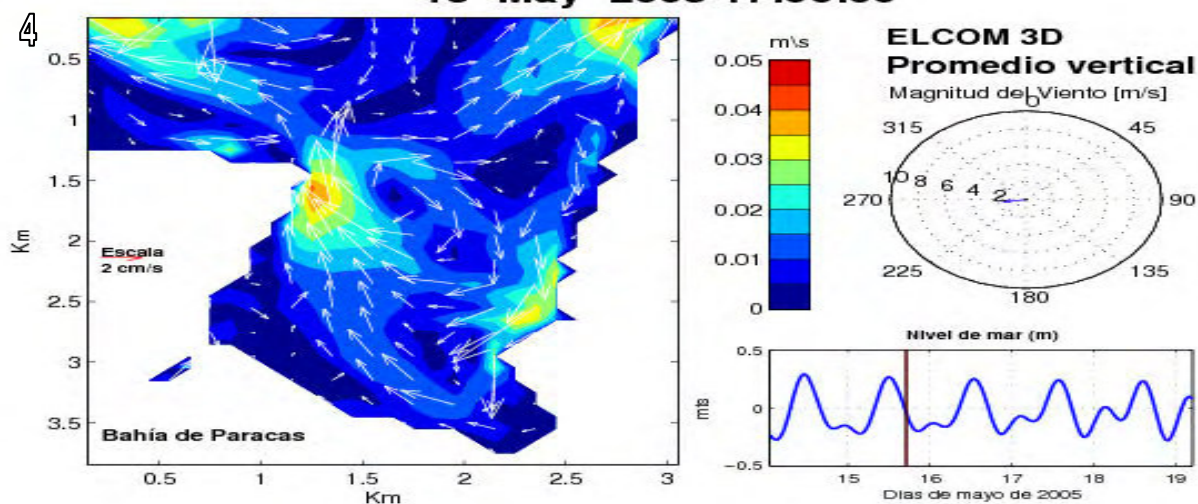


Figura 4.22: Velocidad y distribución horizontal de la rapidez entre las 06:00 15-May-2005 y las 13:00 15-May-2005

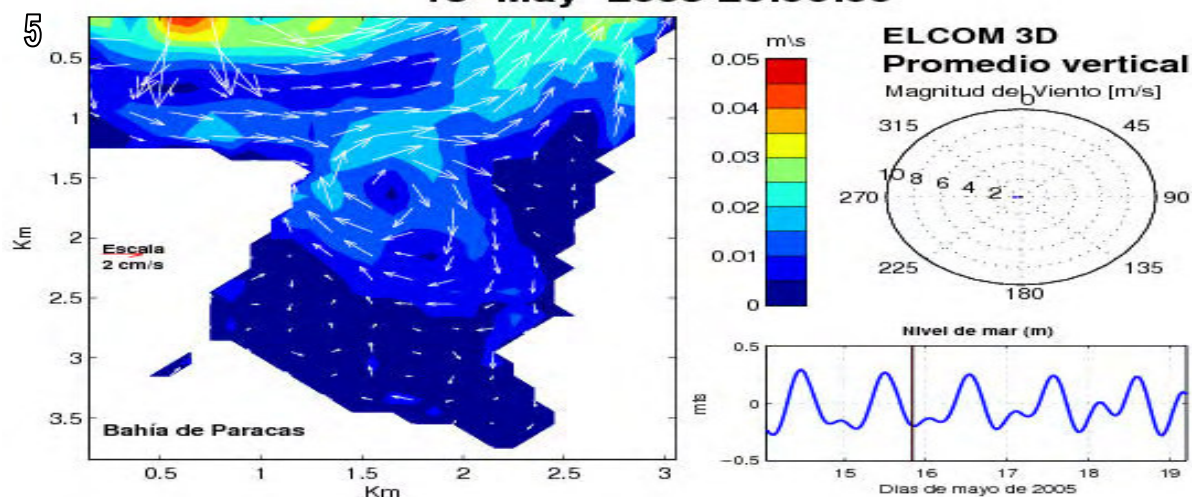


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

15-May-2005 17:00:00



15-May-2005 20:00:00



15-May-2005 23:00:00

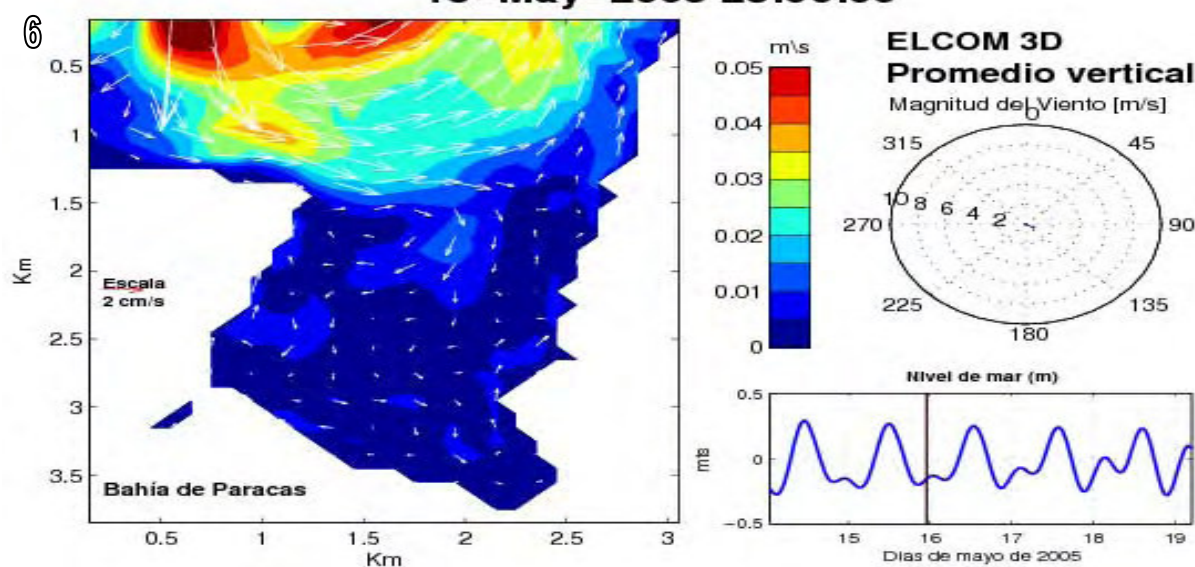


Figura 4.23: Velocidad y distribución horizontal de la rapidez entre las 17:00 15-May-2005 y las 23:00 15-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

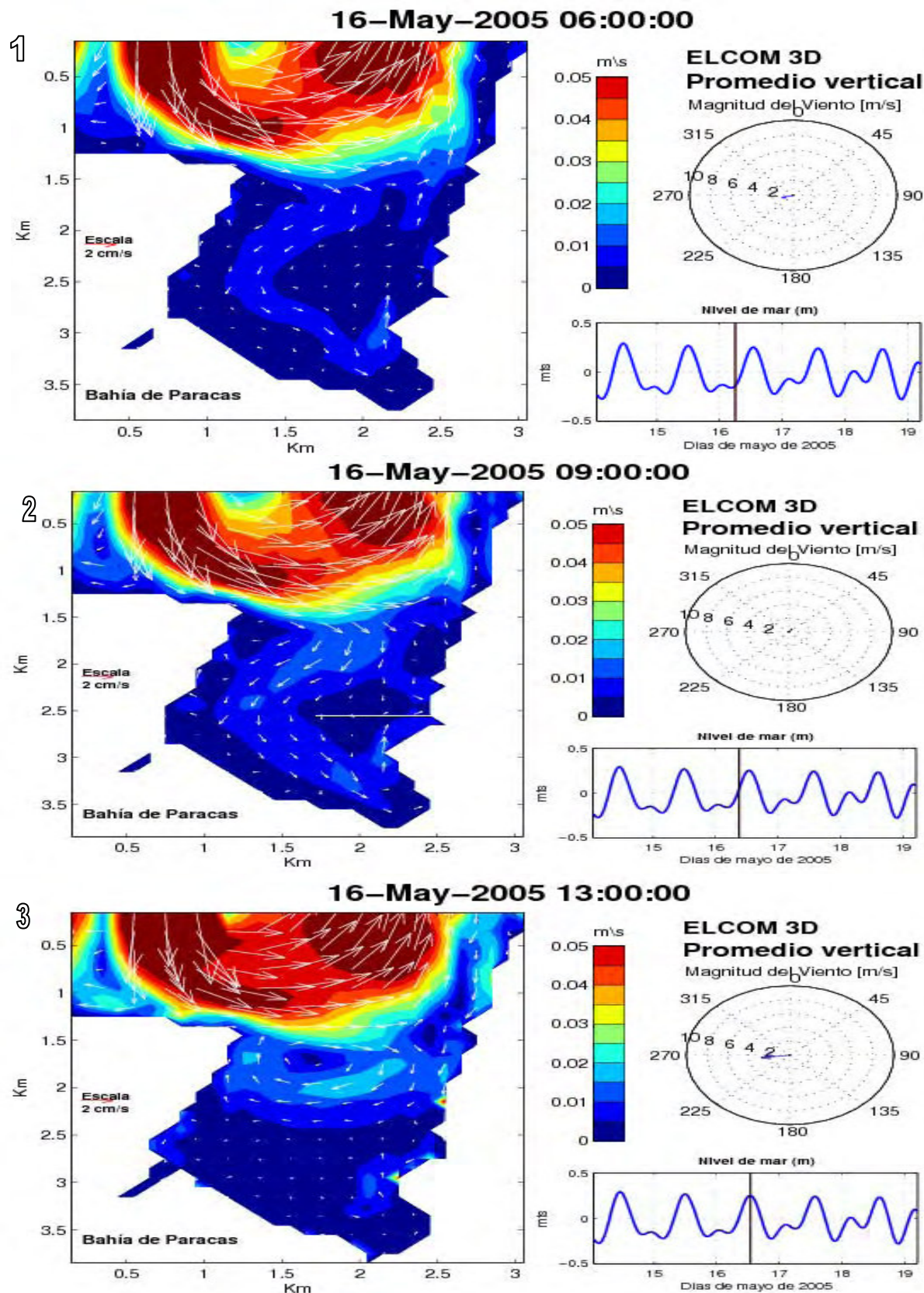


Figura 4.24: Velocidad y distribución horizontal de la rapidez entre las 06:00 16-May-2005 y las 13:00 16-May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Velocidad

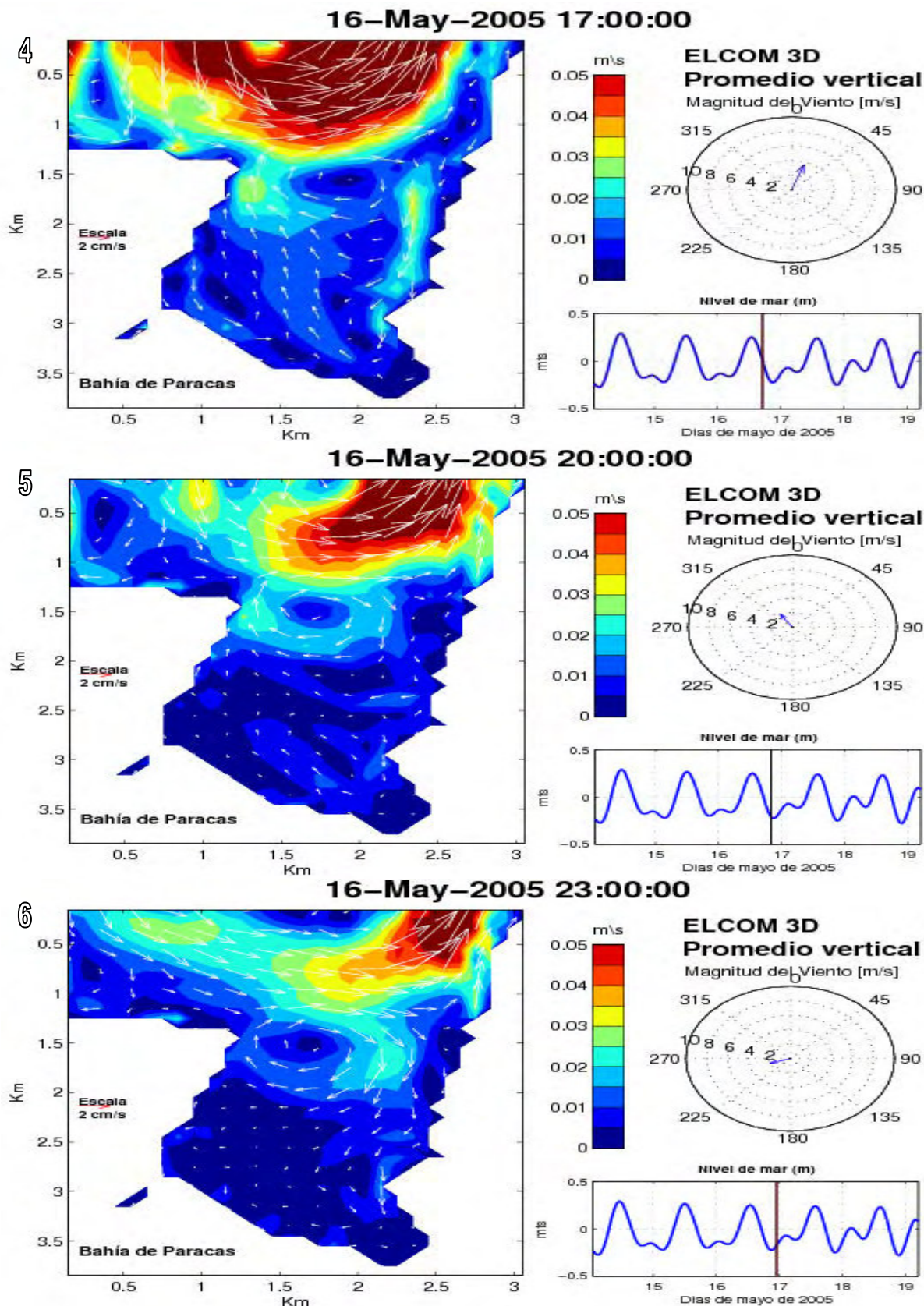


Figura 4.25: Velocidad y distribución horizontal de la rapidez entre las 17:00 16-May-2005 y las 23:00 16-May-2005

#### 4.2.2. Temperatura

En esta sección se presenta resultados obtenidos con ELCOM, que incluyen: una descripción general de la variación espacio-temporal de temperatura simulada en la Bahía.

Las Figuras 4.26 a 4.31 (capa superficial) y las Figuras 4.32 a 4.37 (capa de fondo) muestran los resultados generados por ELCOM para las siguientes secciones horizontales: superficie libre y capa de fondo.

Las figuras de esta sección están ordenadas en paneles 1, 2, 3, 4, 5, y 6 que presentan en orden cronológico la variación diurna de la temperatura en el sistema. Cada panel esta compuesto de tres sub-figuras, en el lado izquierdo de cada panel se presenta la temperatura simulada, graficada sobre la distribución horizontal. Una barra de color indica la escala e intervalo de la temperatura de la simulación. En el lado derecho se presenta dos sub-figuras en la parte superior se muestra un “compás” de viento(magnitud y dirección) y en la parte inferior el nivel del mar. Cada panel muestra la fecha y hora, así como un indicador en cada sub-figura, que señala en qué estado de marea y viento se encontraba el sistema durante la simulación.

La Figura 4.26 presenta la distribución superficial de temperatura. En los paneles 1, 2 y 3 durante el pleamar, se apreció una temperatura que oscila entre 20.5 Y 21.5°C casi homogénea en toda la superficie de la Bahía. Durante la bajamar (paneles 4, 5, y 6 figura 4.27) la temperatura superficial disminuyó 2°C. notándose el ingreso de una pluma de agua fría de temperatura 18°C por la parte Sur de la Bahía. La distribución de temperatura presentada en la Figura 4.28 panel 1 y 2 muestra el ingreso de un núcleo de agua fría de la parte Sur con temperatura de 18°C (pleamar) disminuyendo (ver Figura 4.29 panel 4, 5 y 6) en bajamar. Durante el pleamar 16-May-2005 (ver Figura 4.30 panel 1, 2, y 3) nuevamente esta pluma comienza a desplazarse hacia la Bahía, aumentando e



inundando ligeramente la Bahía por la parte central (ver Figura 4.31 panel 4, 5 y 6).

La disminución de la temperatura superficial se debe a la pleamar que trae agua de menor temperatura proveniente de la parte Sur de la Bahía. Se puede considerar que la temperatura en la superficie es casi estable posiblemente por la radiación solar.

La Figura 4.32 presenta la distribución de temperatura en el fondo de la Bahía. Durante el medio día, paneles 1, 2 y 3, la temperatura en el fondo fue de 18°C en la zona profunda y de 21 °C en la zona somera. La temperatura observada y modelada en la parte profunda correspondió con el flujo y reflujo de la marea.

Se observa el ingreso de un núcleo de agua fría de 18°C a la Bahía en bajamar (ver Figura 4.33 paneles 4, 5 y 6). Este inunda la Bahía en pleamar (ver Figura 4.34 paneles 1, 2 y 3) disminuyendo durante el bajamar día 15-May-2005 (ver Figura 4.35 paneles 4, 5 y 6) e inundándola nuevamente 16-May-2005 (ver Figura 4.37 paneles 4, 5 y 6).

La persistencia en la estructura de temperatura sugiere una distribución, donde la temperatura de la zona profunda puede estar influenciada por el flujo y reflujo de la marea.

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

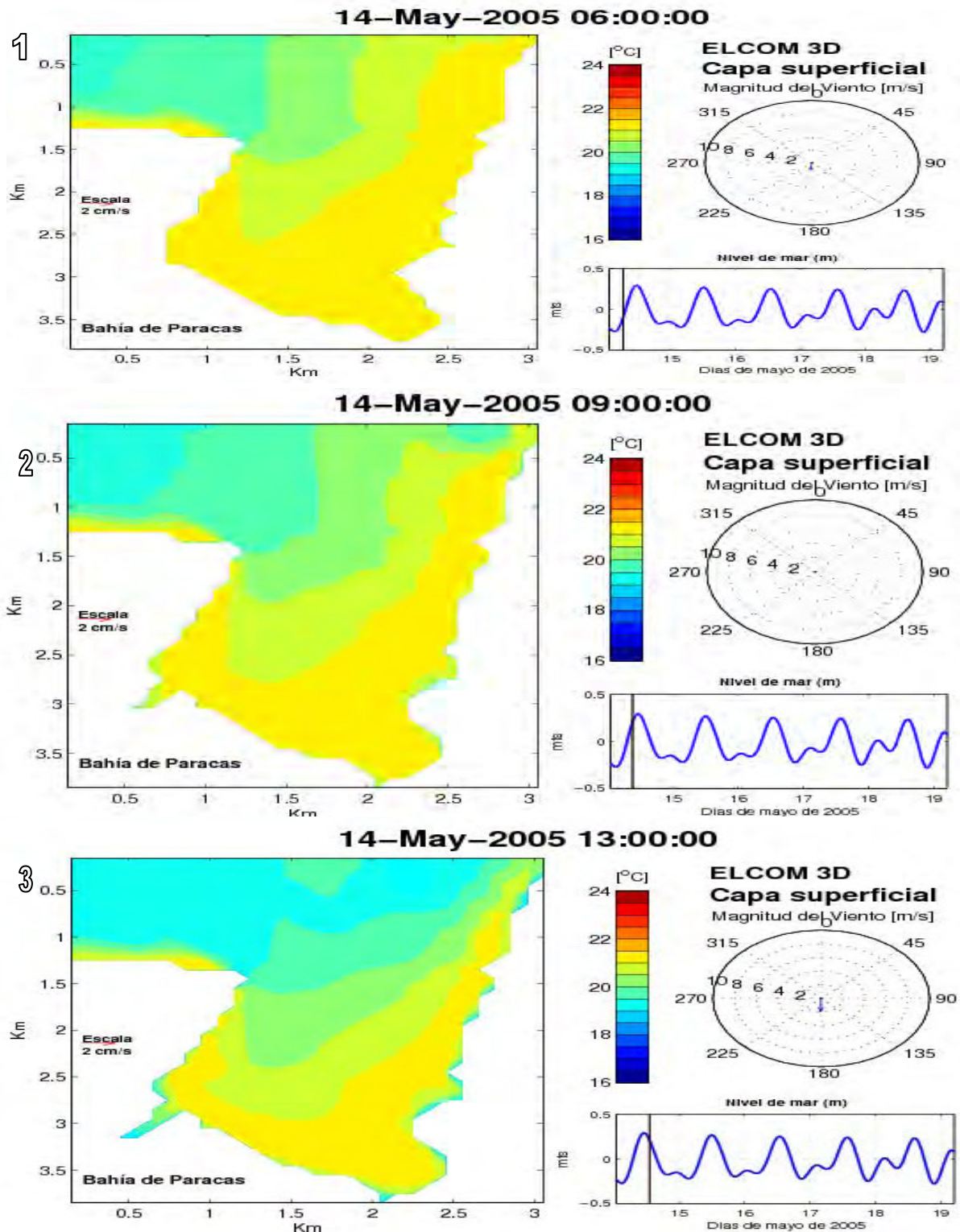


Figura 4.26: Distribución horizontal de la temperatura en la capa superficial entre las 06:00 14 May-2005 y las 13:00 14 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

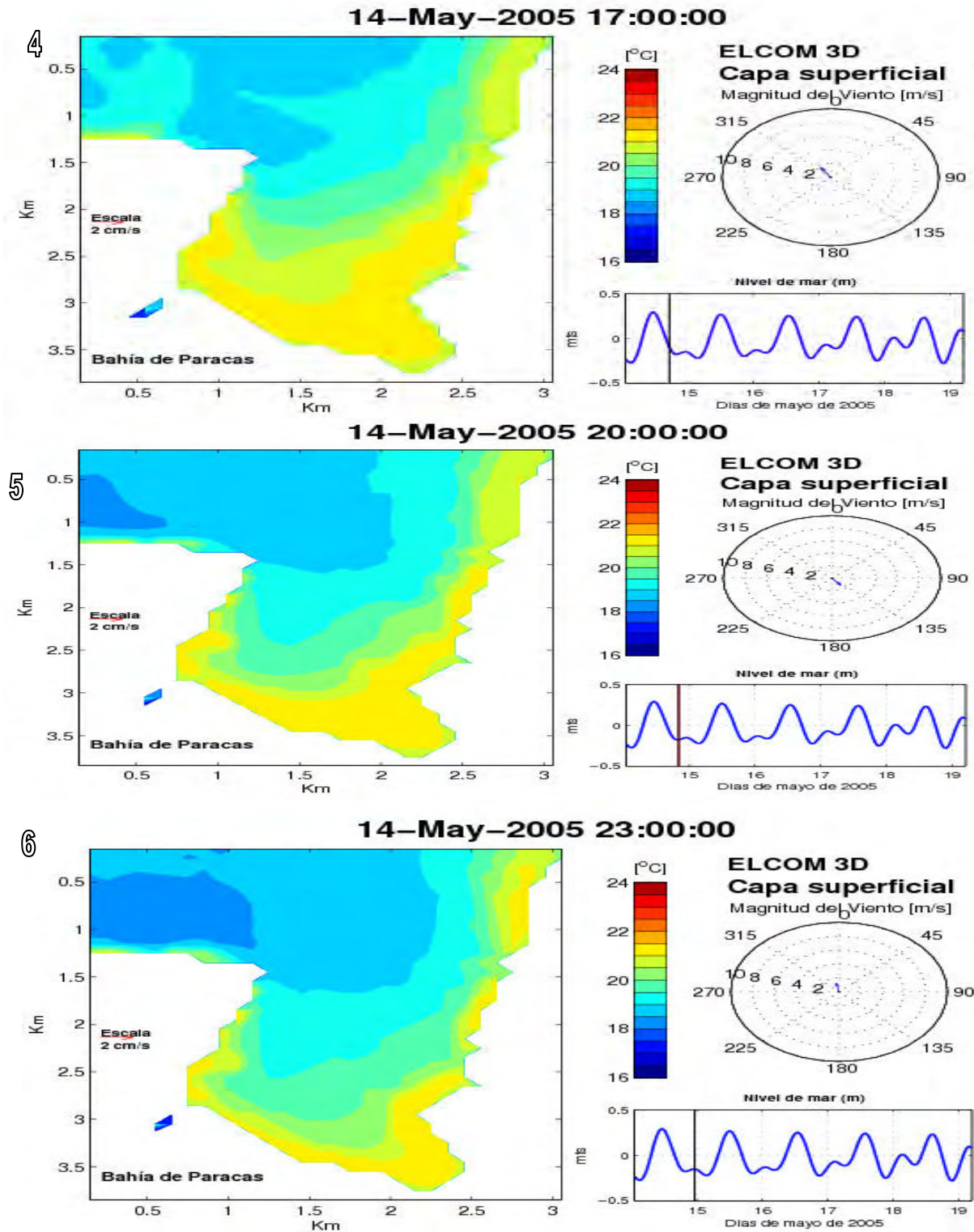
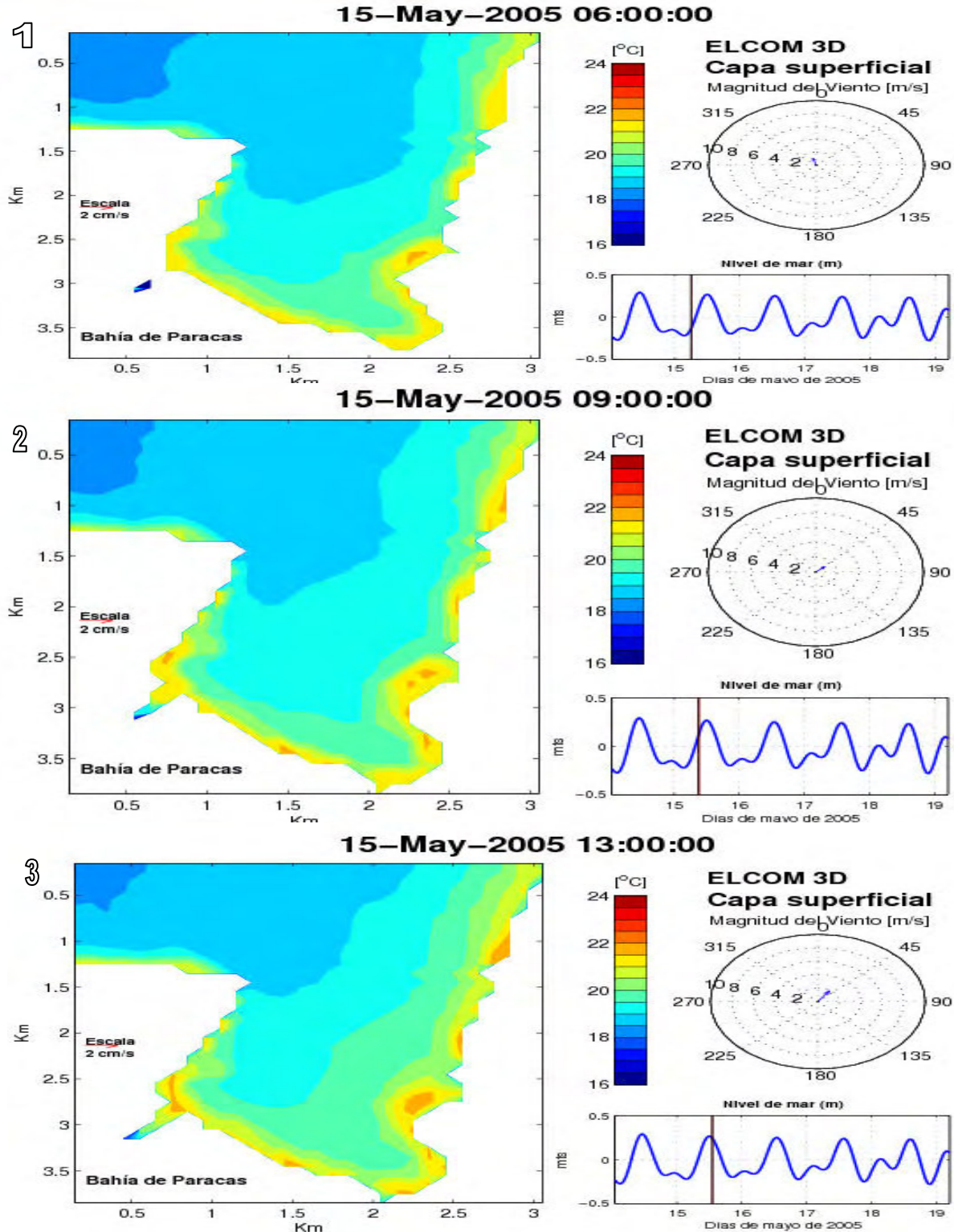


Figura 4.27: Distribución horizontal de la temperatura en la capa superficial entre las 17:00 14 May-2005 y las 23:00 14 May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura



**Figura 4.28: Distribución horizontal de la temperatura en la capa superficial entre las 06:00 15 May-2005 y las 13:00 15 May-2005**

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

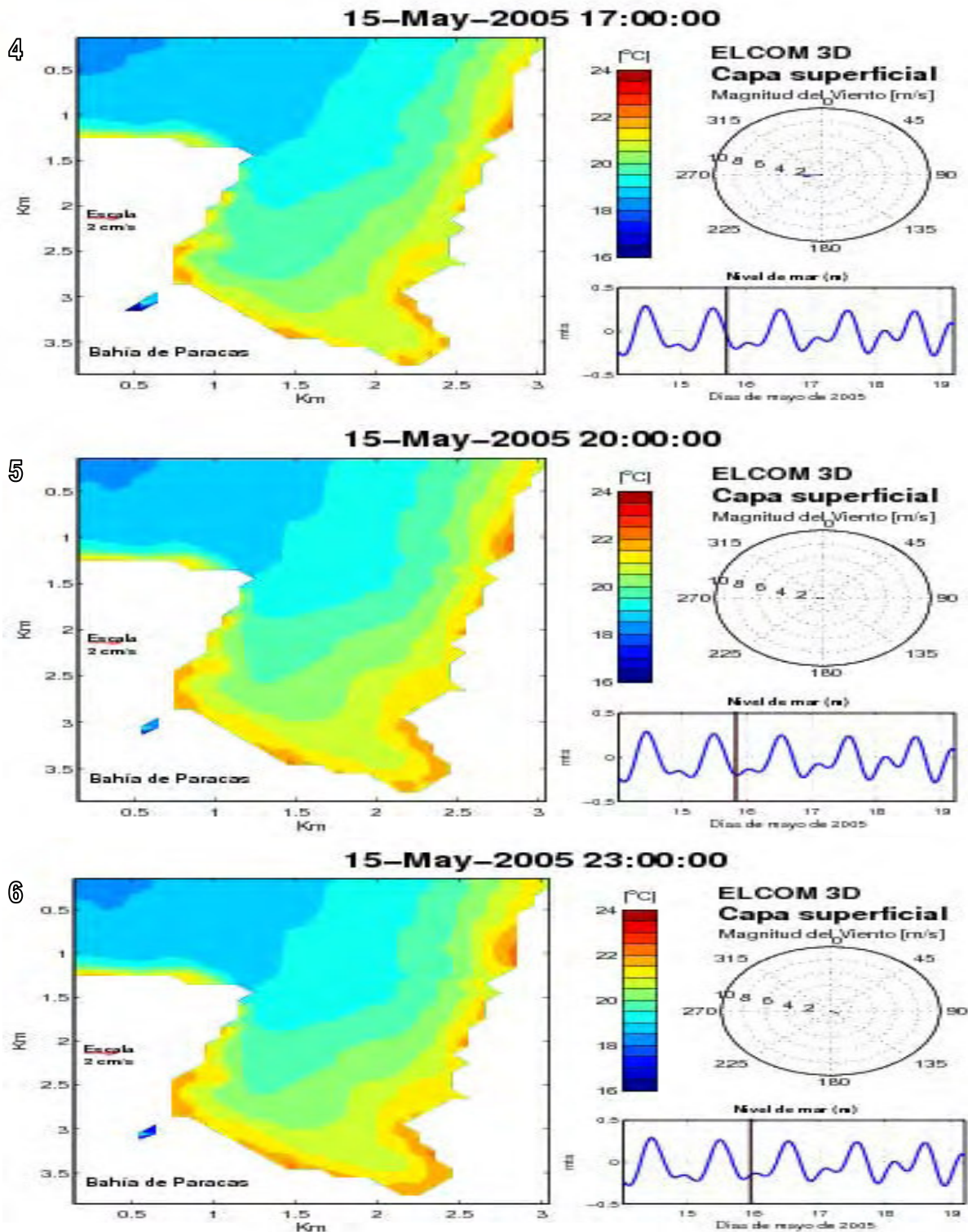
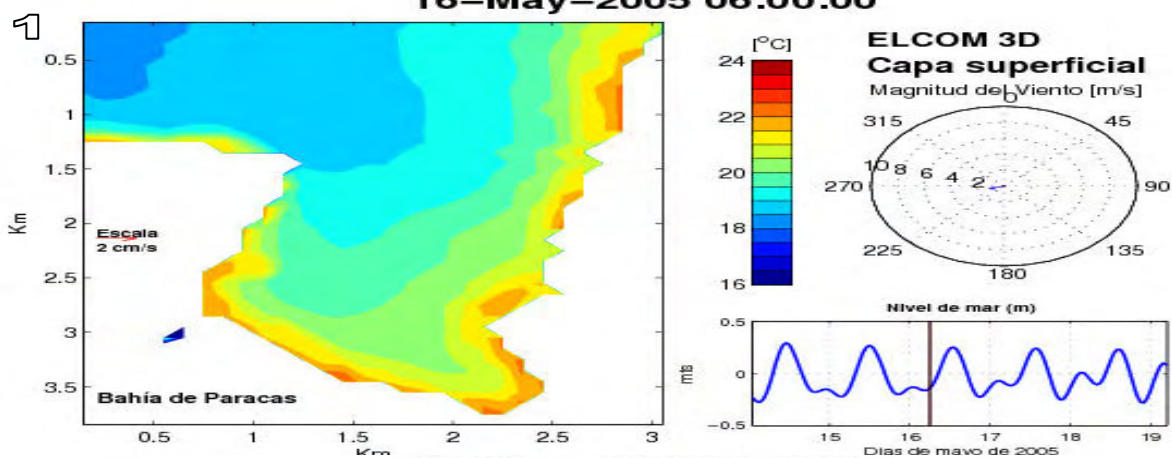


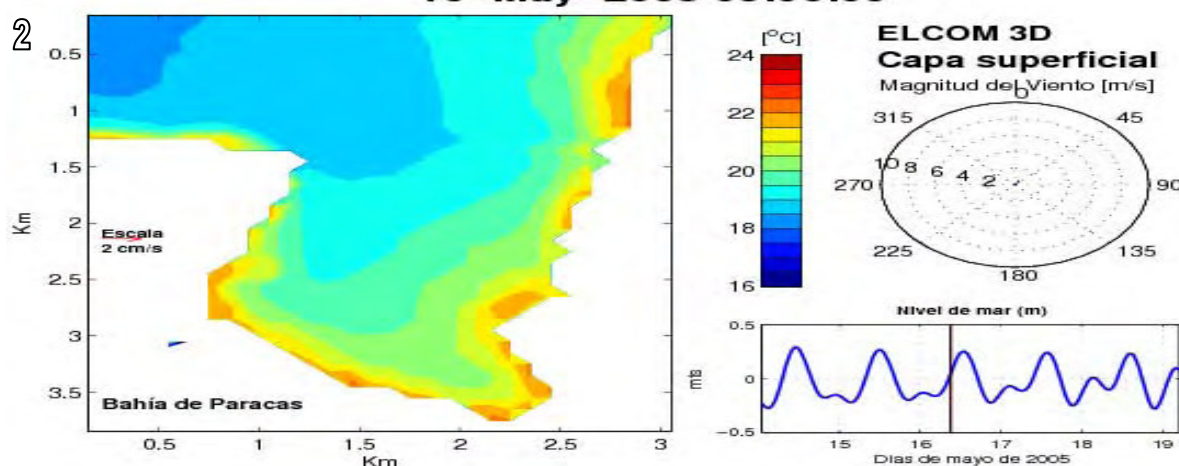
Figura 4.29: Distribución horizontal de la temperatura en la capa superficial entre las 17:00 15 May 2005 y las 23:00 15 May 2005

## Bahía Paracas: Resultados EL COM 3D. Temperatura

16-May-2005 06:00:00



16-May-2005 09:00:00



16-May-2005 13:00:00

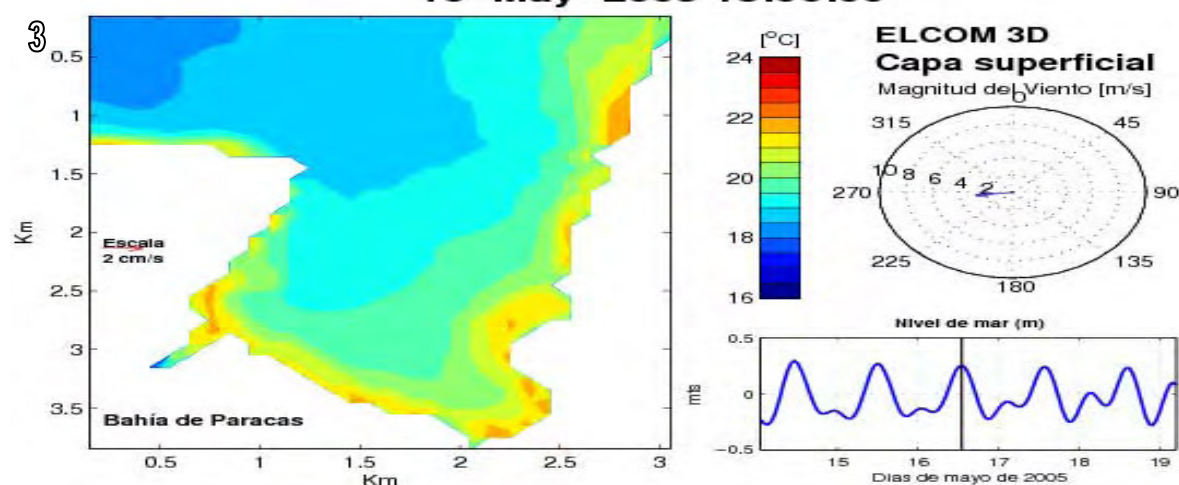
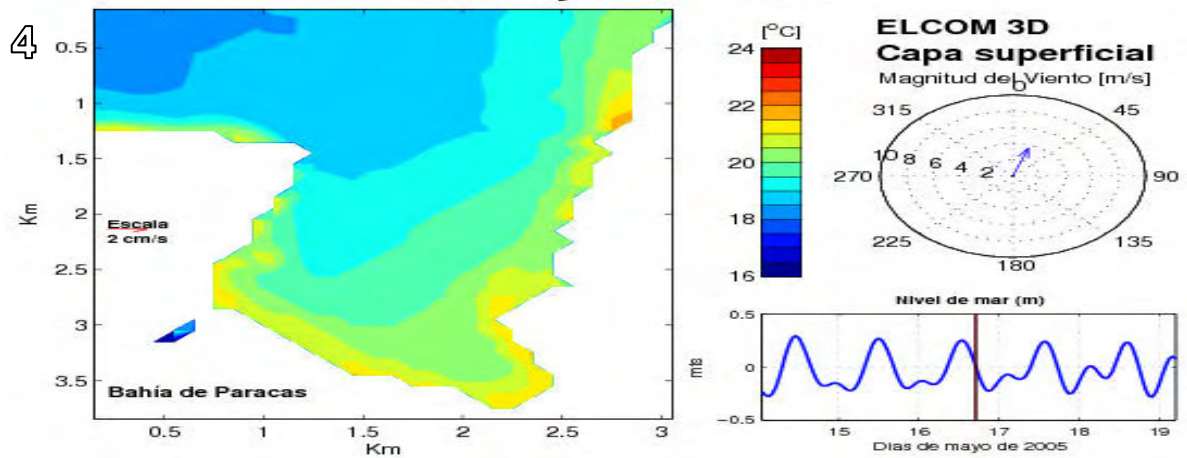


Figura 4.30: Distribución horizontal de la temperatura en la capa superficial entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005

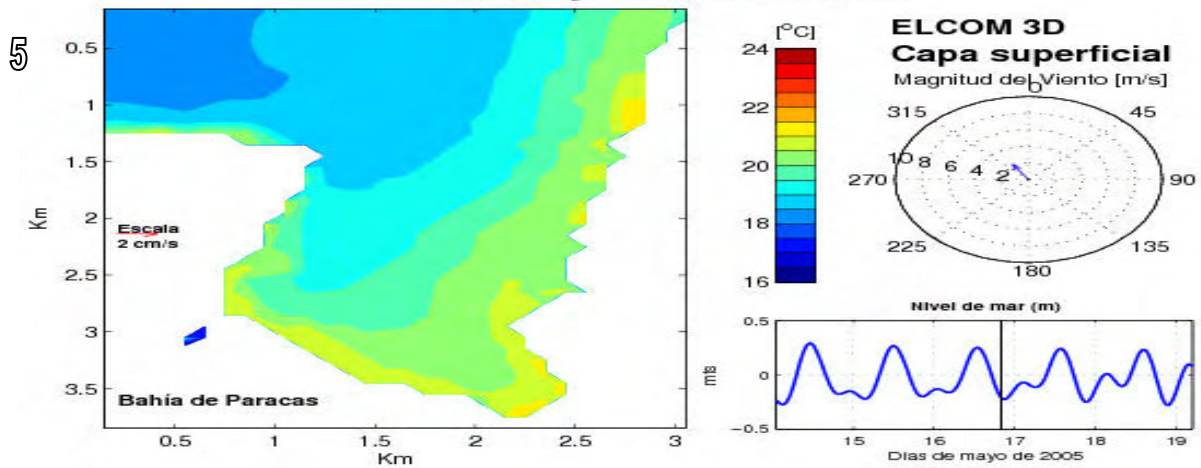


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

16-May-2005 17:00:00



16-May-2005 20:00:00



16-May-2005 23:00:00

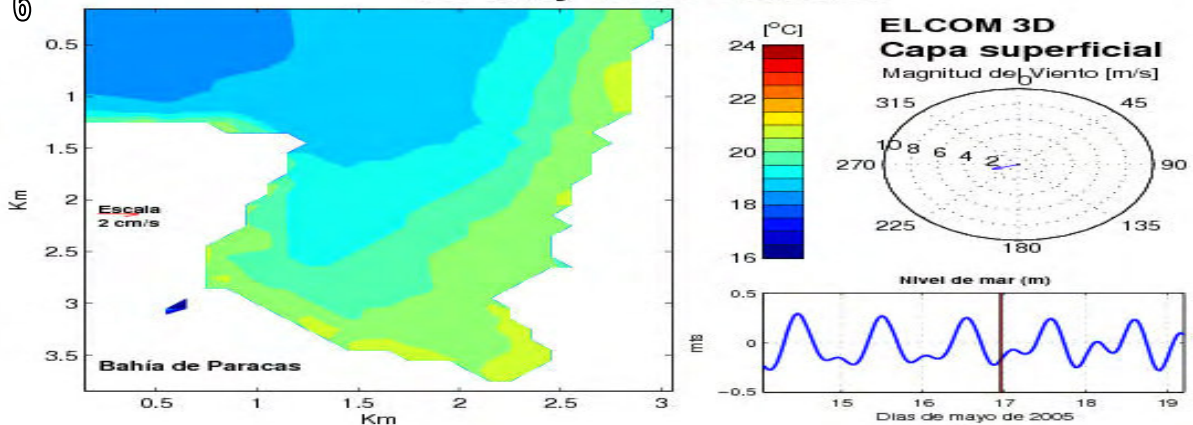
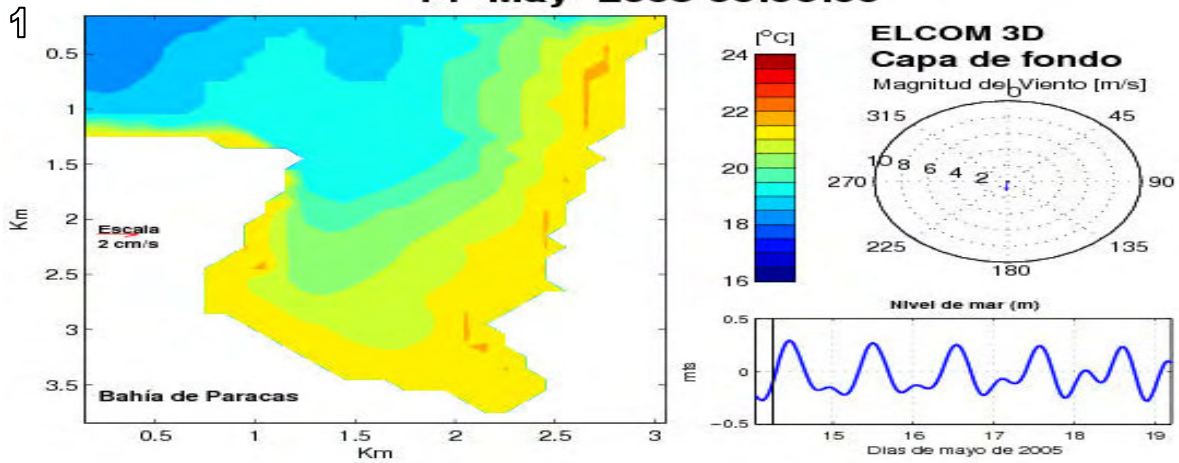


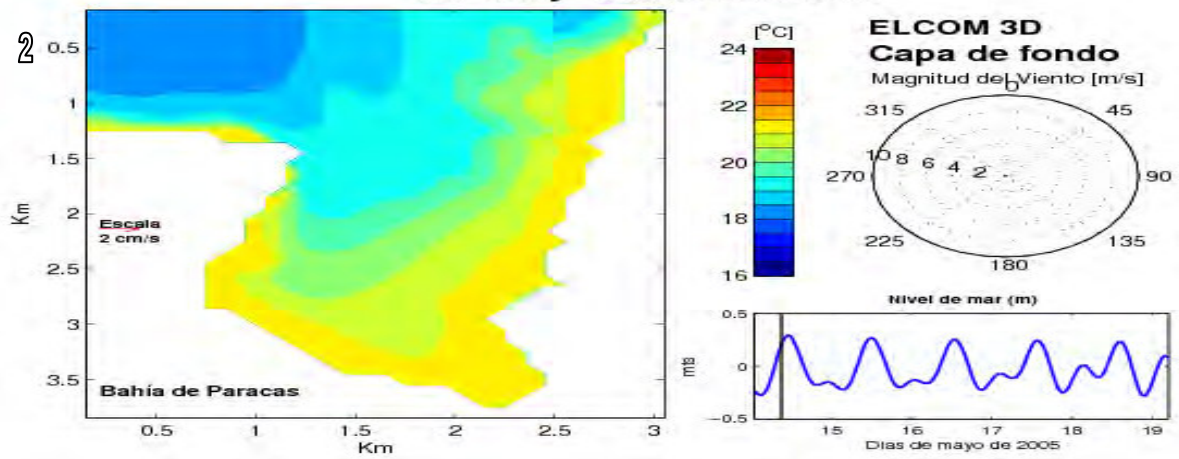
Figura 4.31: Distribución horizontal de la temperatura en la capa superficial entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

14-May-2005 06:00:00



14-May-2005 09:00:00



14-May-2005 13:00:00

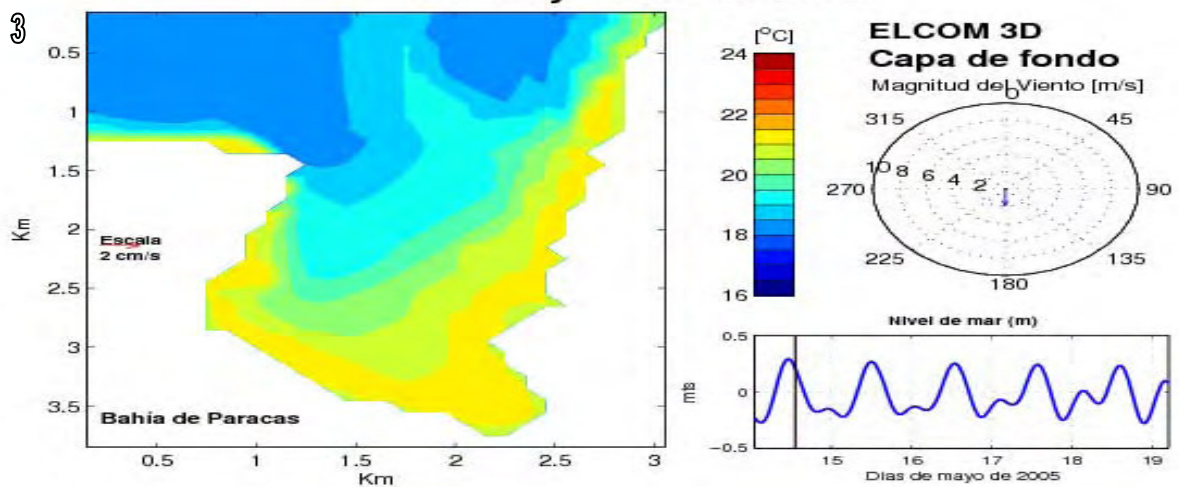


Figura 4.32: Distribución horizontal de la temperatura en la capa de fondo entre las 06:00 14-May-2005 y las 13:00 14-May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

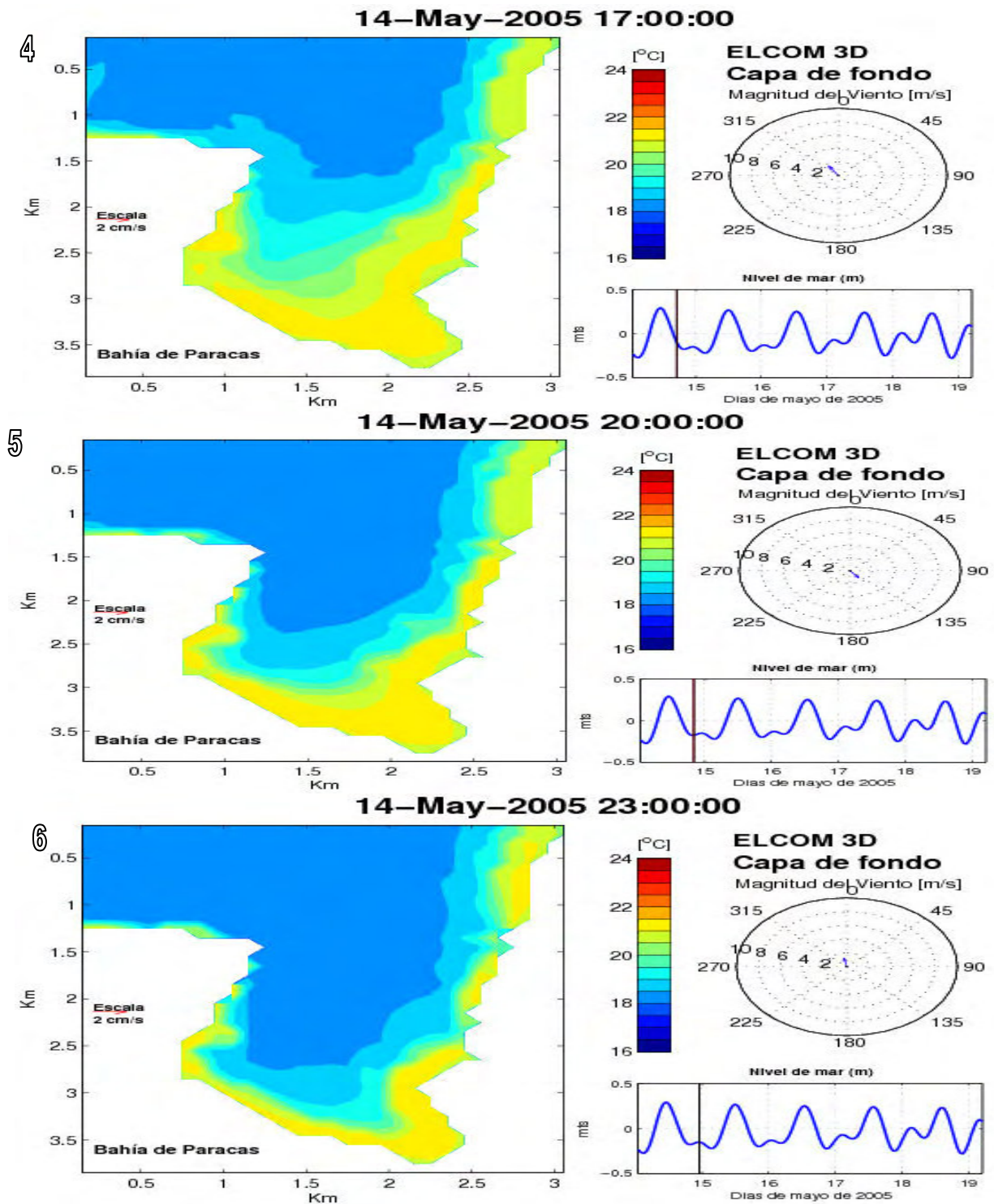


Figura 4.33: Distribución horizontal de la temperatura de la capa de fondo entre las 17:00 14-May-2005 y las 23:00 14-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

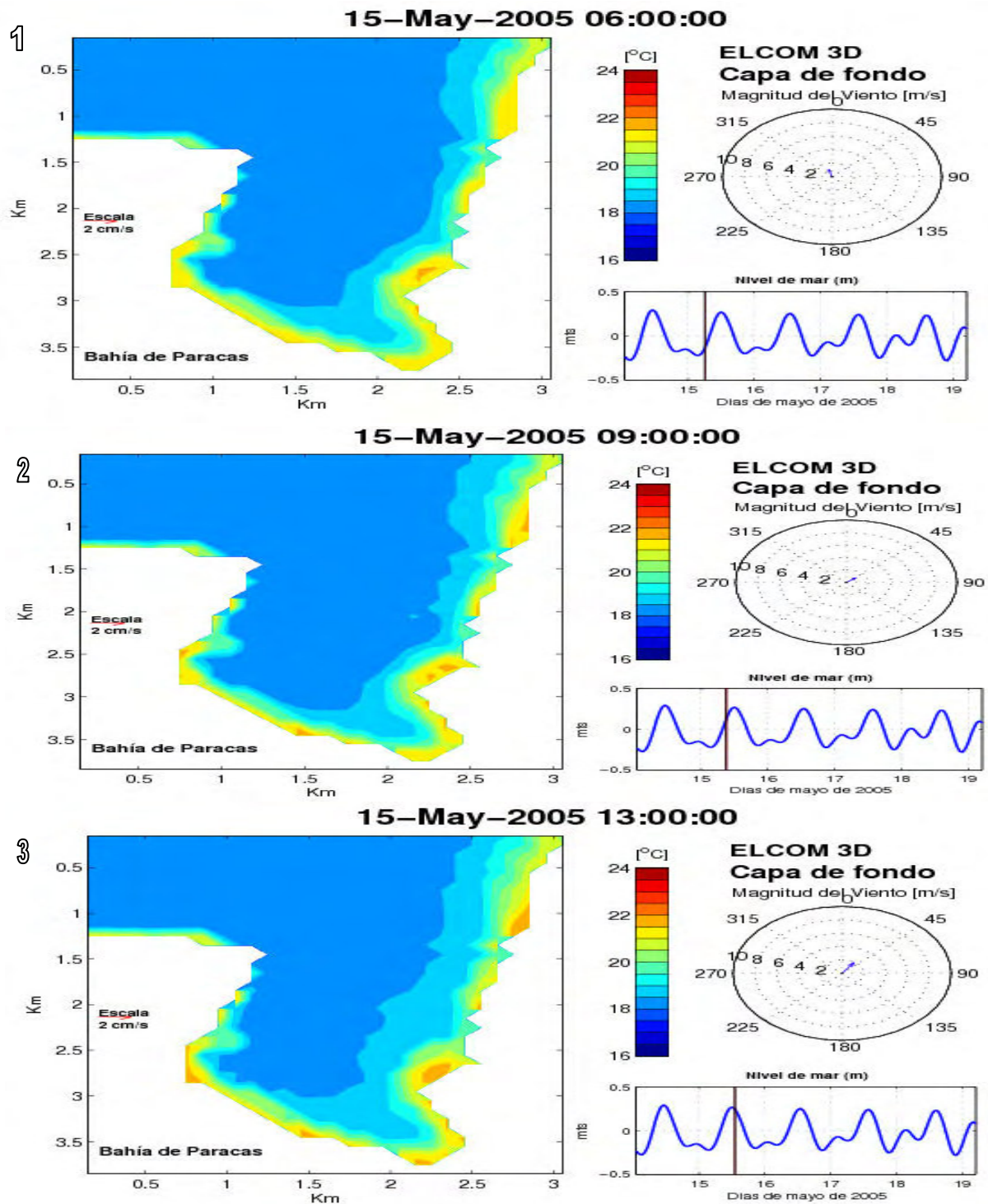
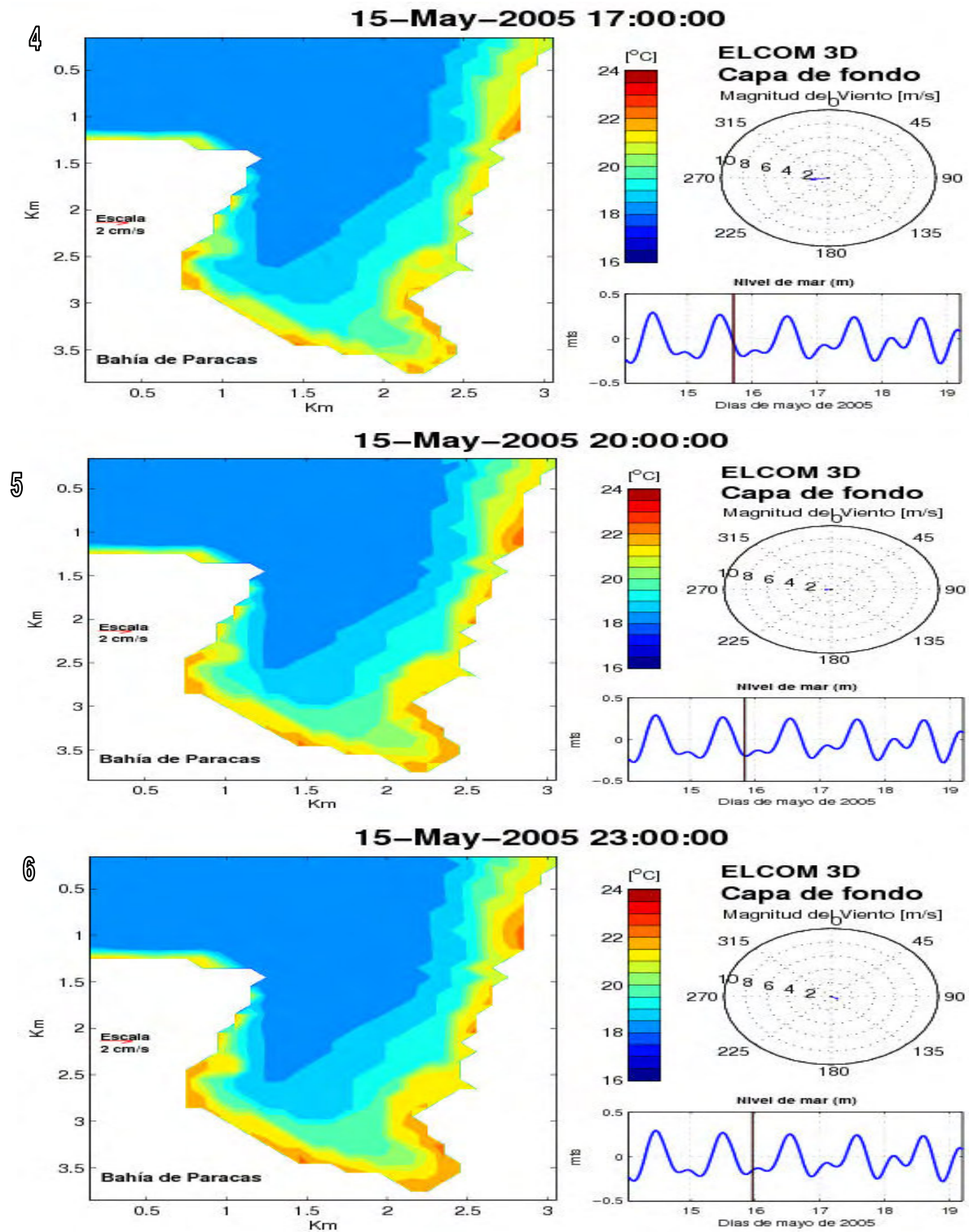


Figura 4.34: Distribución horizontal de la temperatura en la capa de fondo entre las 06:00 15 May-2005 y las 13:00 15 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura



**Figura 4.35: Distribución horizontal de la temperatura en la capa de fondo entre las 17:00 15 May-2005 y las 23:00 15 May-2005**



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

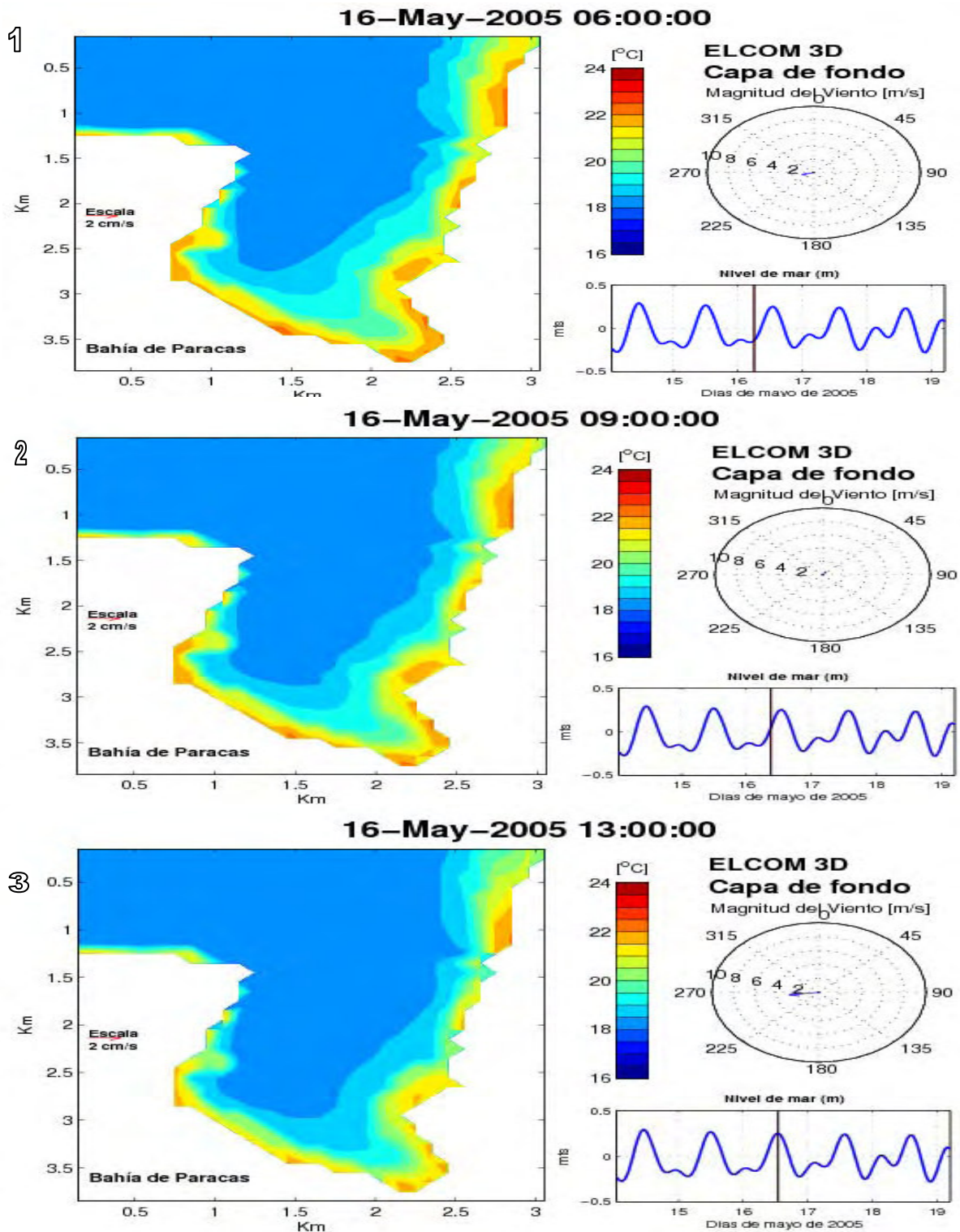
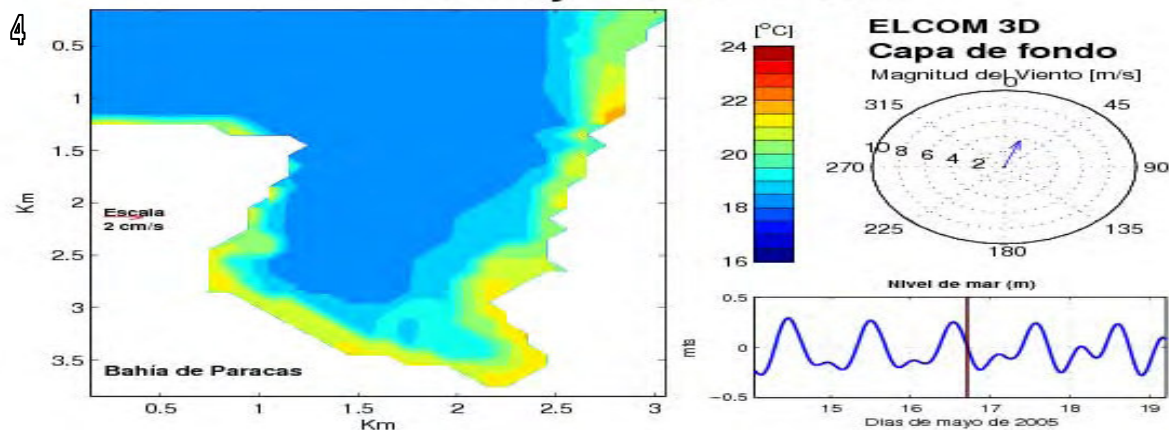


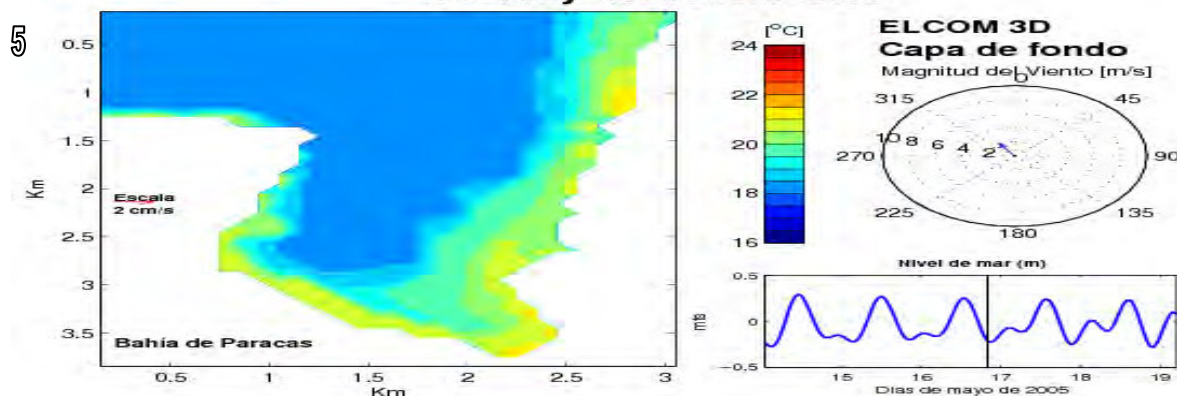
Figura 4.36: Distribución horizontal de la temperatura en la capa de fondo entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Temperatura

16-May-2005 17:00:00



16-May-2005 20:00:00



16-May-2005 23:00:00

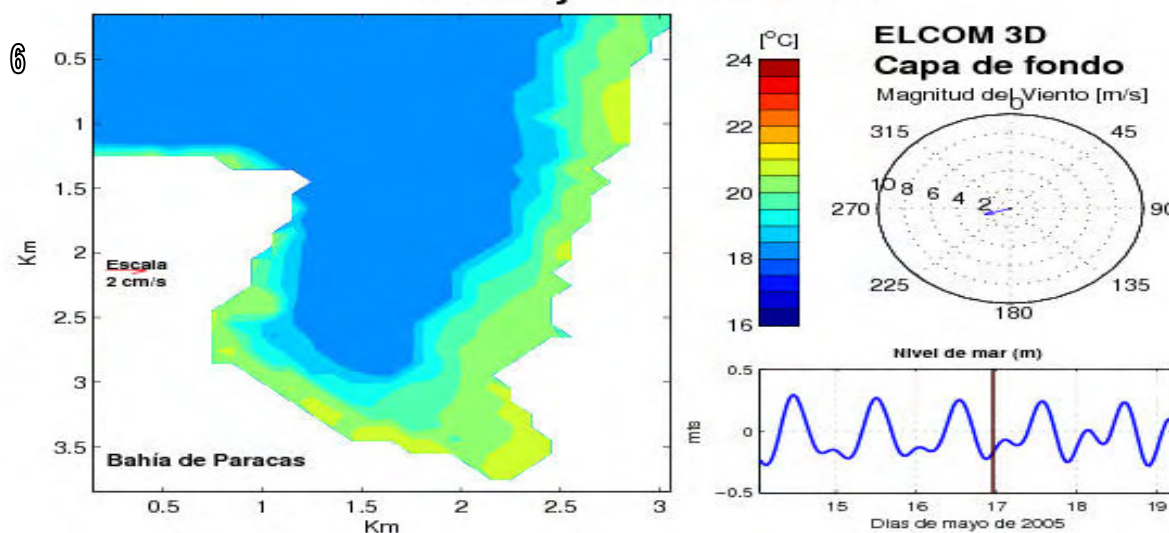


Figura 4.37: Distribución horizontal de la temperatura en la capa de fondo entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005

### 4.2.3. Salinidad

En esta sección se presentan resultados obtenidos con ELCOM, que incluyen una descripción general de la variación espacio-temporal de la salinidad simulada en la Bahía.

Las Figuras 4.38 a 4.43 (capa superficial) y Figuras 4.44 a 4.49 (capa de fondo) muestran los resultados generados por ELCOM para las siguientes secciones horizontales: superficie libre y capa de fondo.

Las figuras de esta sección están ordenadas en paneles 1, 2, 3, 4, 5 y 6 que presentan en orden cronológico la variación diurna de la salinidad en el sistema. Cada panel está compuesto de tres sub-figuras, en el lado izquierdo de cada panel se presenta la salinidad simulada, graficada sobre la distribución horizontal. Una barra de color indica la escala e intervalo de la salinidad de la simulación. En el lado derecho se presenta dos sub-figuras, en la parte superior se muestra un “compás” de viento (magnitud y dirección) y en la parte inferior el nivel del mar. Cada panel muestra la fecha y hora, así como un indicador en cada sub-figura, que señala en qué estado de marea y viento se encontraba el sistema durante la simulación.

La Figura 4.38 presenta la distribución superficial de la salinidad durante la pleamar. La salinidad superficial muestra variaciones de salinidad no mayores a 0.1 UPS (35.0 – 35.1 UPS), casi completamente homogénea en la superficie de la Bahía; en los paneles 1, 2 y 3, se observa un núcleo de agua con salinidad 35.0 UPS desplazándose hacia el interior de la Bahía inundando completamente en bajamar (ver Figura 4.39 panel 6) durante todo el día de simulación; esta situación se mantuvo casi homogénea en el sistema durante los siguientes pleamares y bajamares hasta el 16-May-2005 (ver Figura 4.43 panel 4), observándose una ligera variación a 35,1 UPS entre la 20:00 y 23:00 h del 16-May-2005.

La salinidad superficial es característica de la época del año. La estructura espacio-temporal homogénea podría indicar que la Bahía adyacente tiene la misma salinidad superficial que la zona Sur de la Bahía, por lo que el intercambio de agua se hace menos notable. La distribución de la salinidad (34.0 - 35.1 UPS) puede deberse a la presencia de viento débil durante las fechas de la simulación, lo que hace que el sistema sea forzado sólo por la marea.

Las Figuras 4.44 a 4.49 muestran la variación de la salinidad en el fondo de la Bahía de Paracas. La salinidad en la zona profunda (35 - 35.1 UPS) presentó un comportamiento casi similar a la capa superficial durante los pleamares y bajamares.

La poca diferencia de salinidad entre las zonas someras y profundas podría deberse a la fuerte estratificación, ocasionada por la radiación solar y temperatura ambiente. Sin embargo, las variaciones de salinidad no fueron mayores a 0,1 UPS por lo que la estratificación observada puede considerarse como función de la temperatura.



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

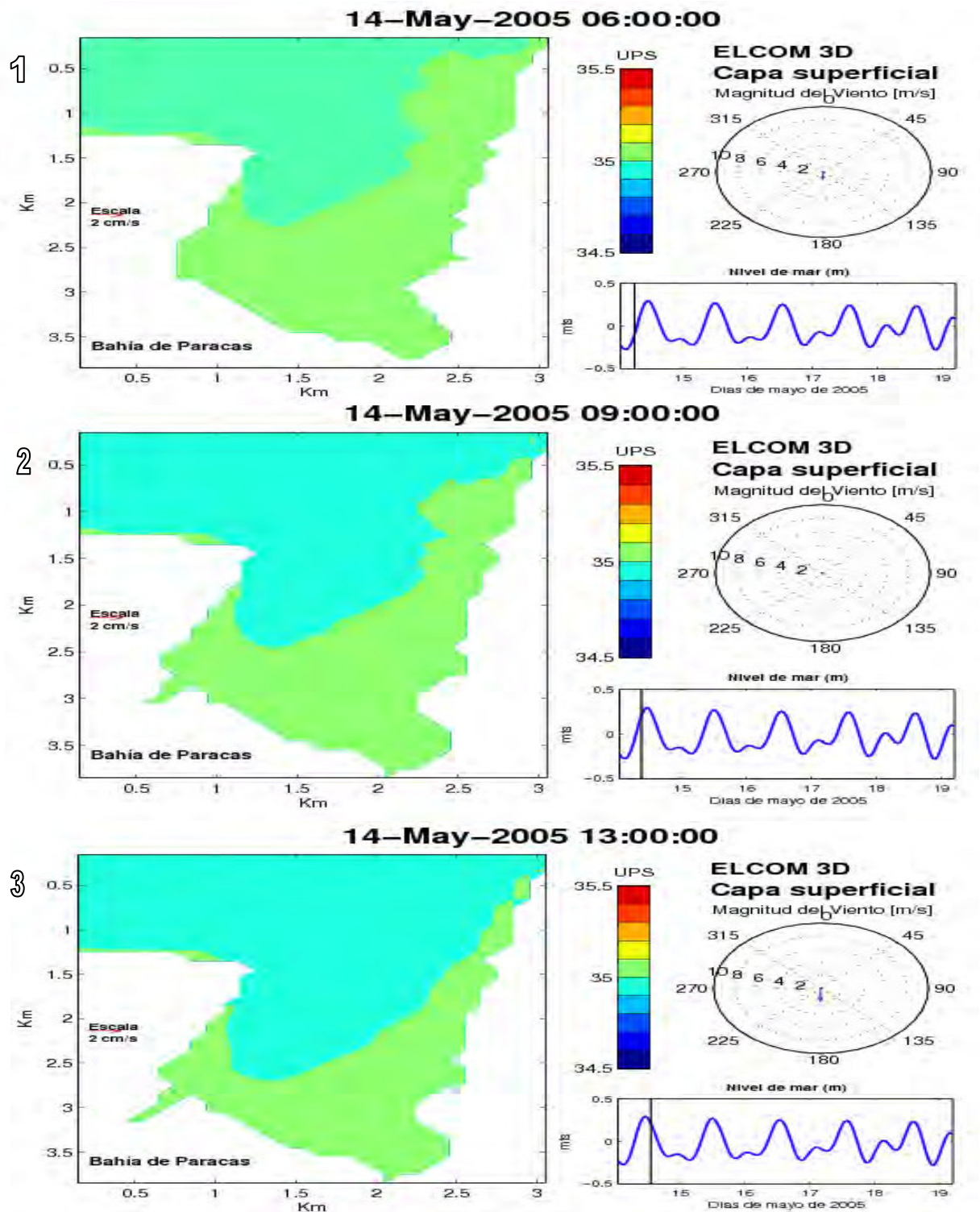


Figura 4.38: Distribución horizontal de la salinidad en la capa superficial entre las 06:00 14 May-2005 y las 13:00 14 May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

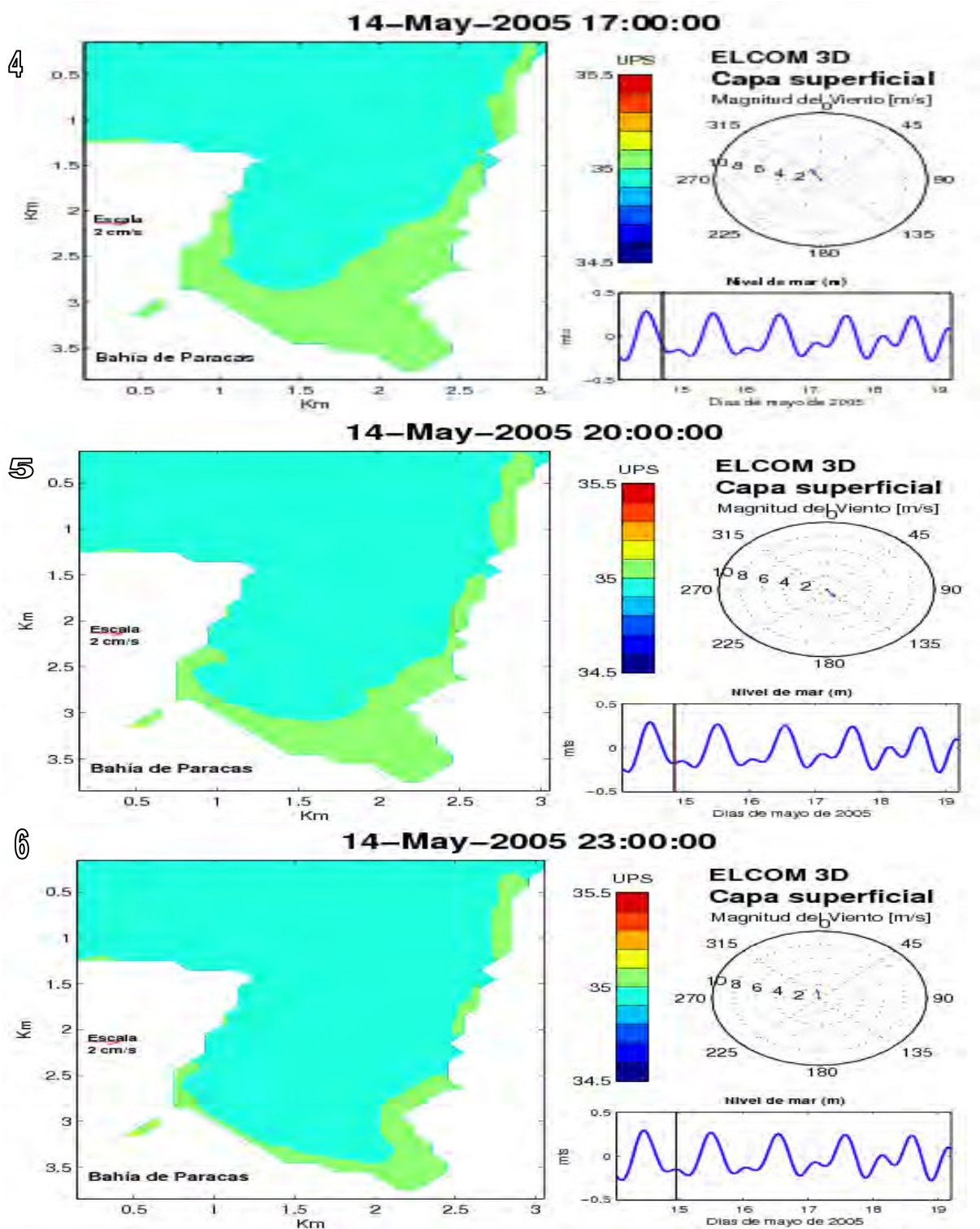
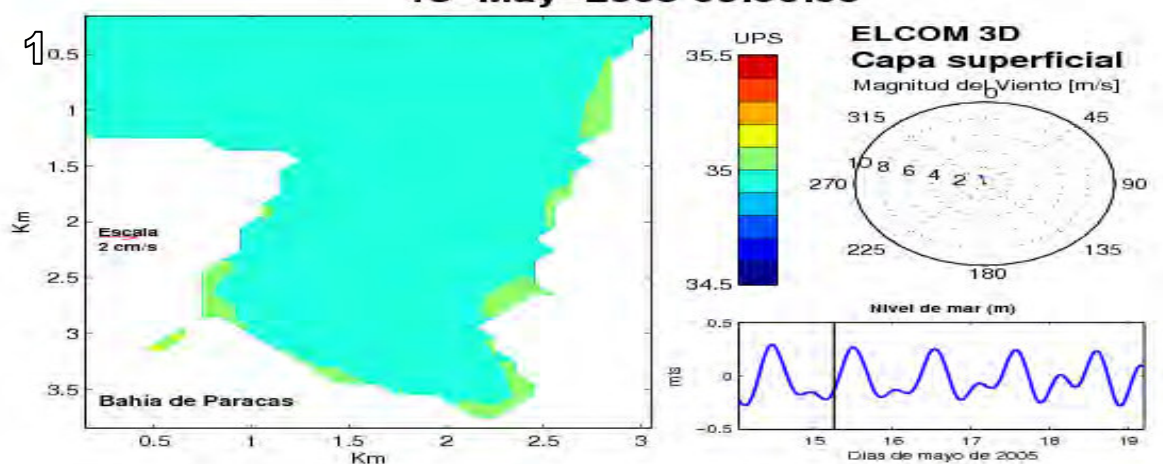


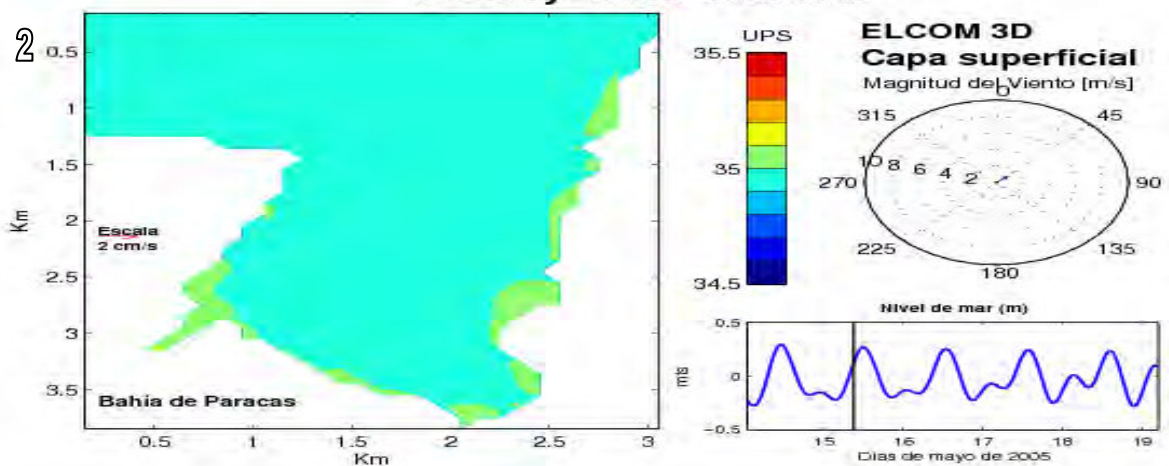
Figura 4.39: Distribución horizontal de la salinidad en la capa superficial entre las 17:00 14 May-2005 y las 23:00 14 May-2005

### Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

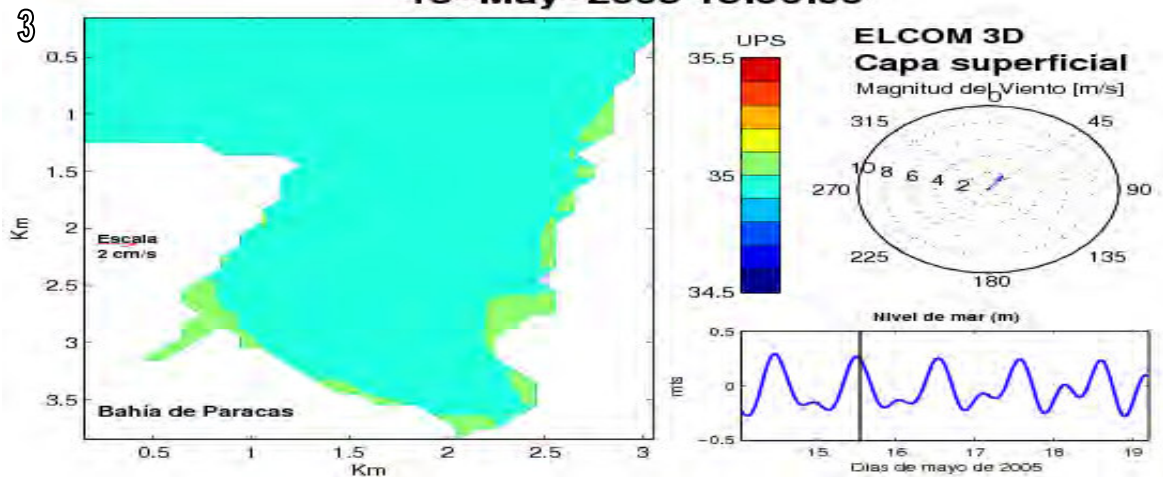
15-May-2005 06:00:00



**15-May-2005 09:00:00**



15-May-2005 13:00:00



**Figura 4.40: Distribución horizontal de la salinidad en la capa superficial entre las 06:00 15 May-2005 y las 13:00 15May-2005**

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

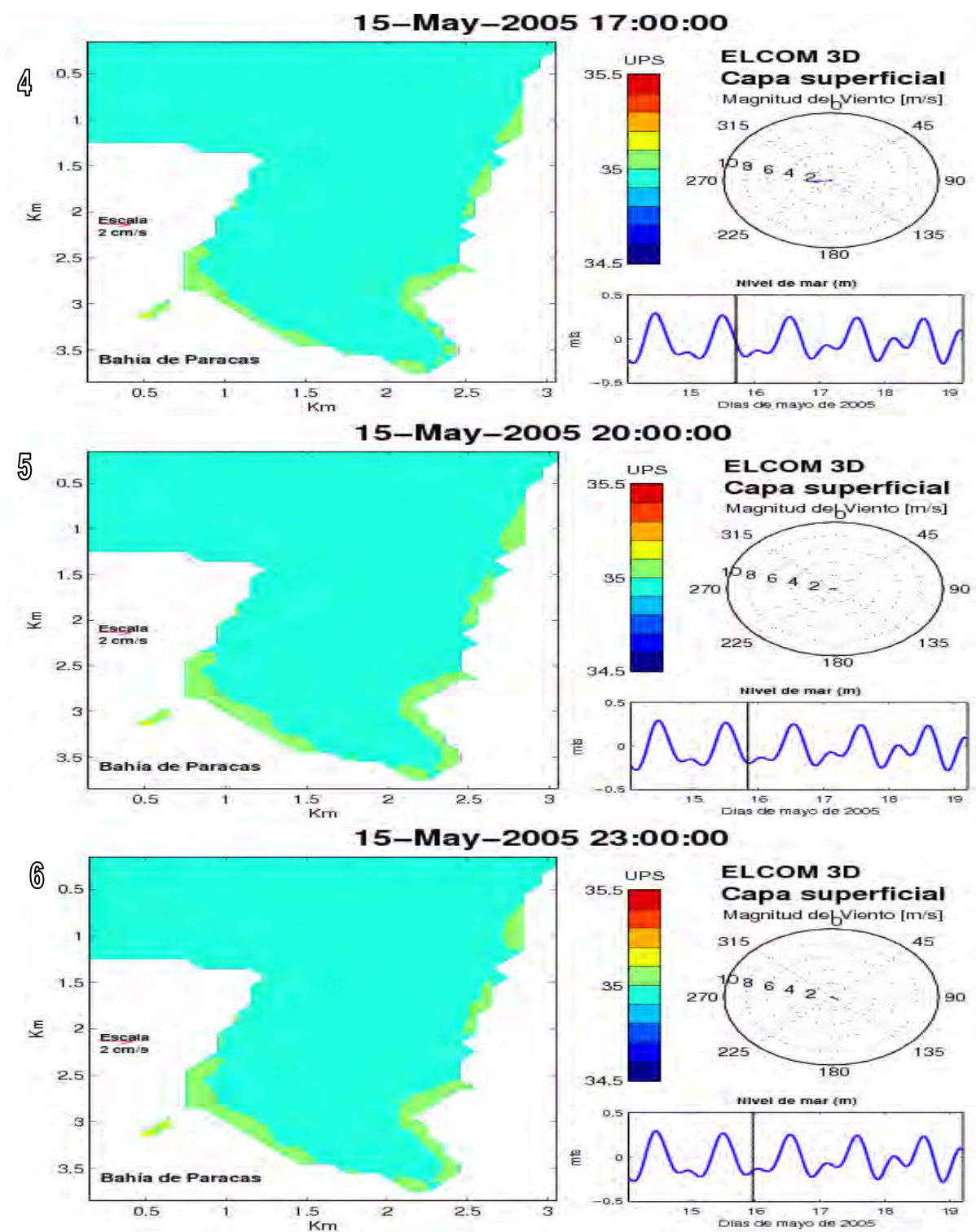
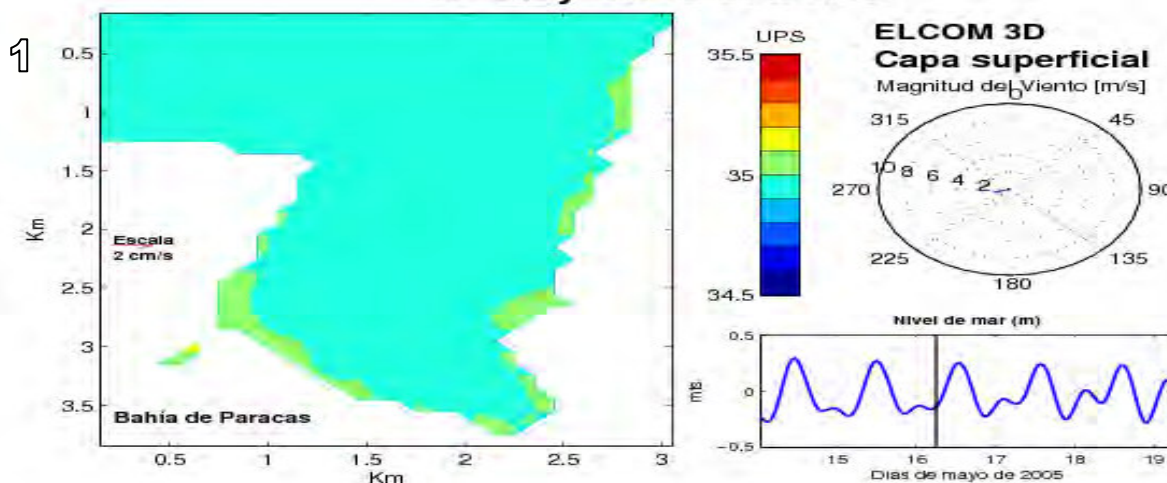


Figura 4.41: Distribución horizontal de la salinidad en la capa superficial entre las 17:00 15 May-2005 y las 23:00 15 May-2005

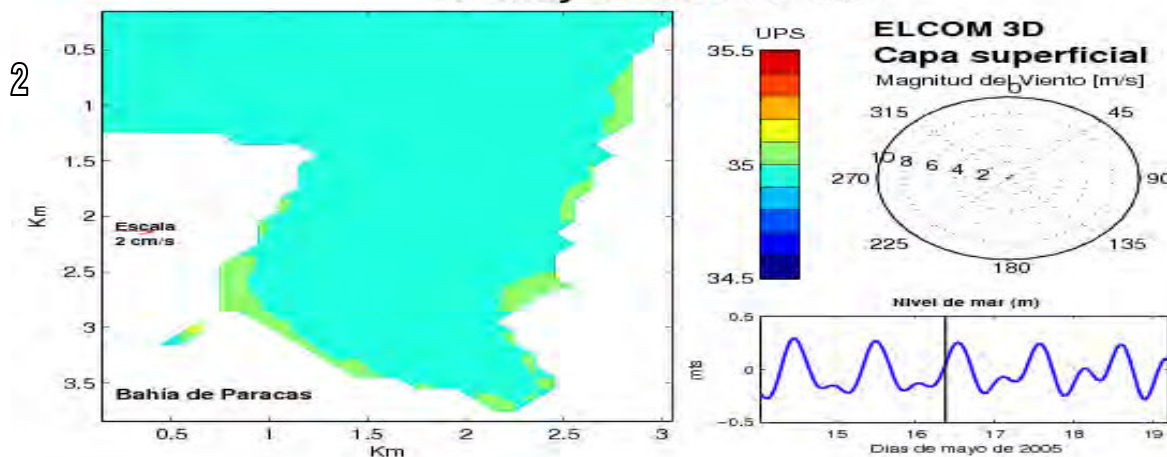


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

16-May-2005 06:00:00



16-May-2005 09:00:00



16-May-2005 13:00:00

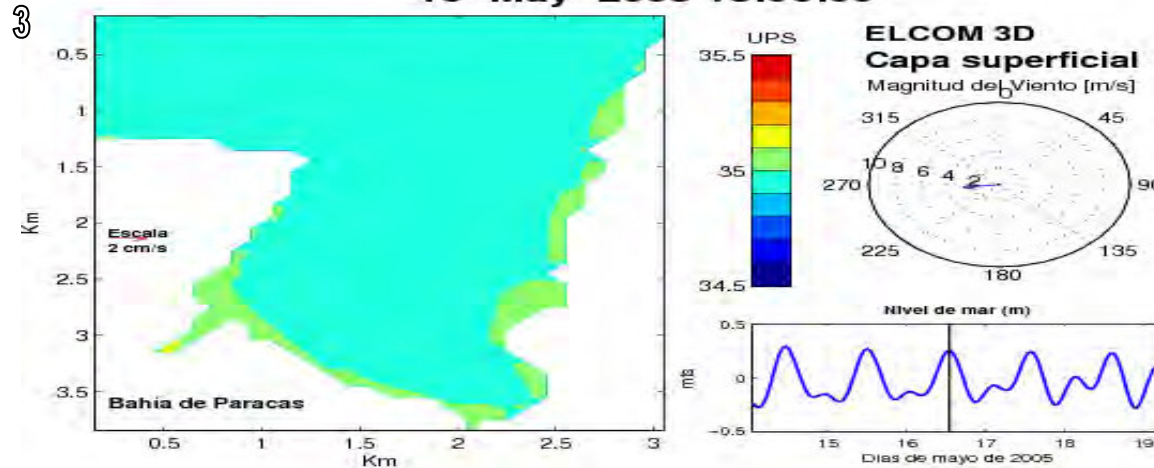


Figura 4.42: Distribución horizontal de la salinidad en la capa superficial entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

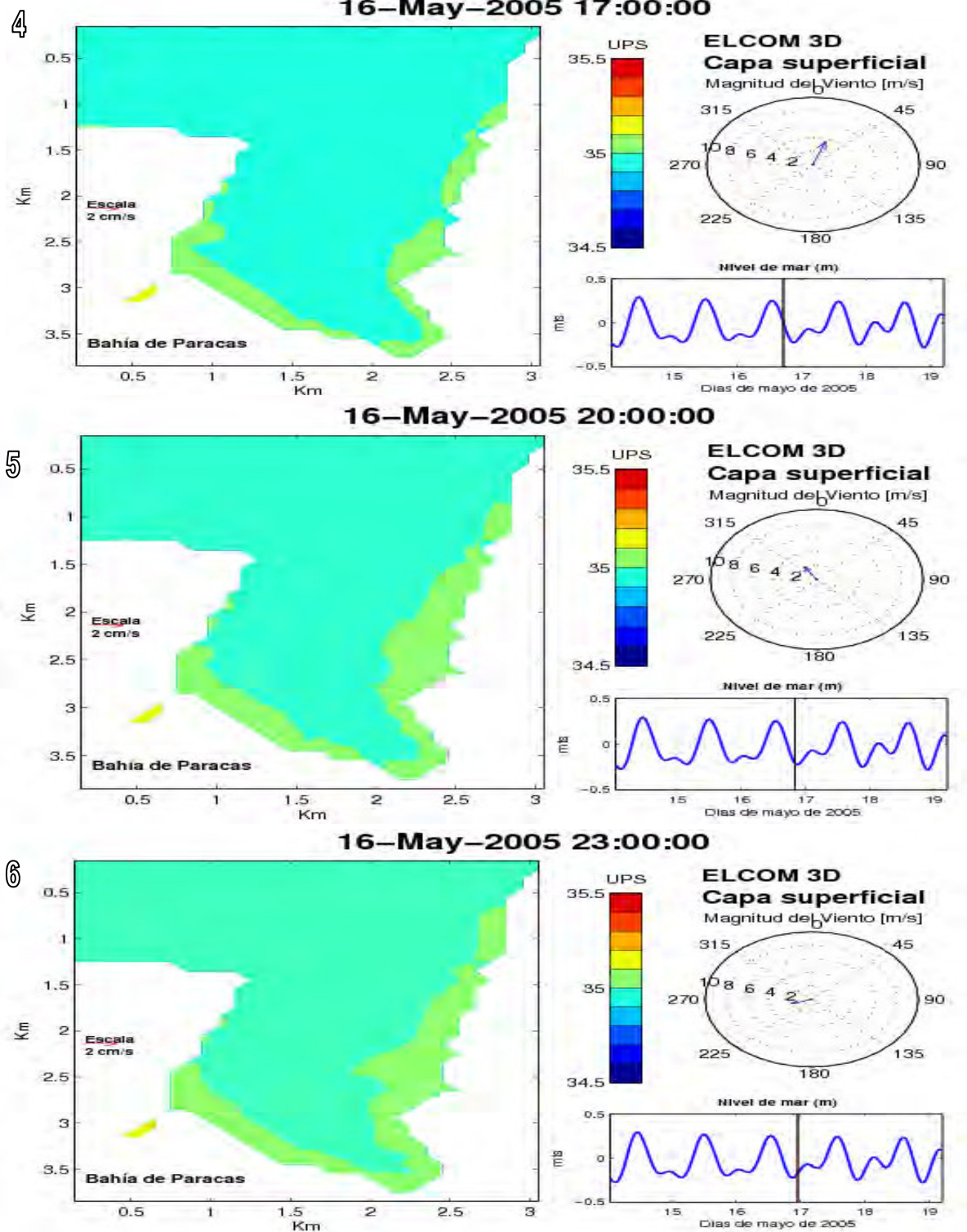


Figura 4.43: Distribución horizontal de la salinidad en la capa superficial entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

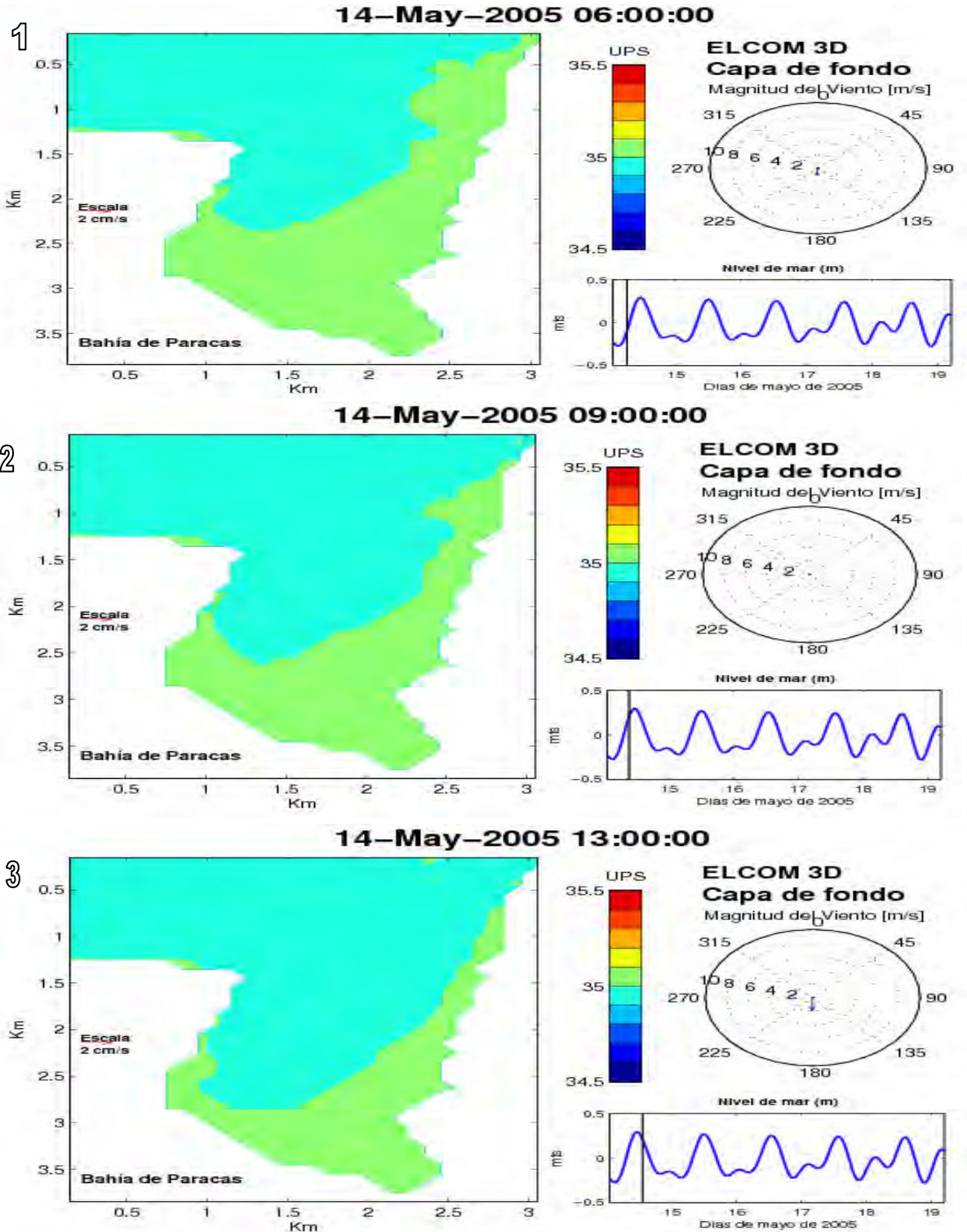
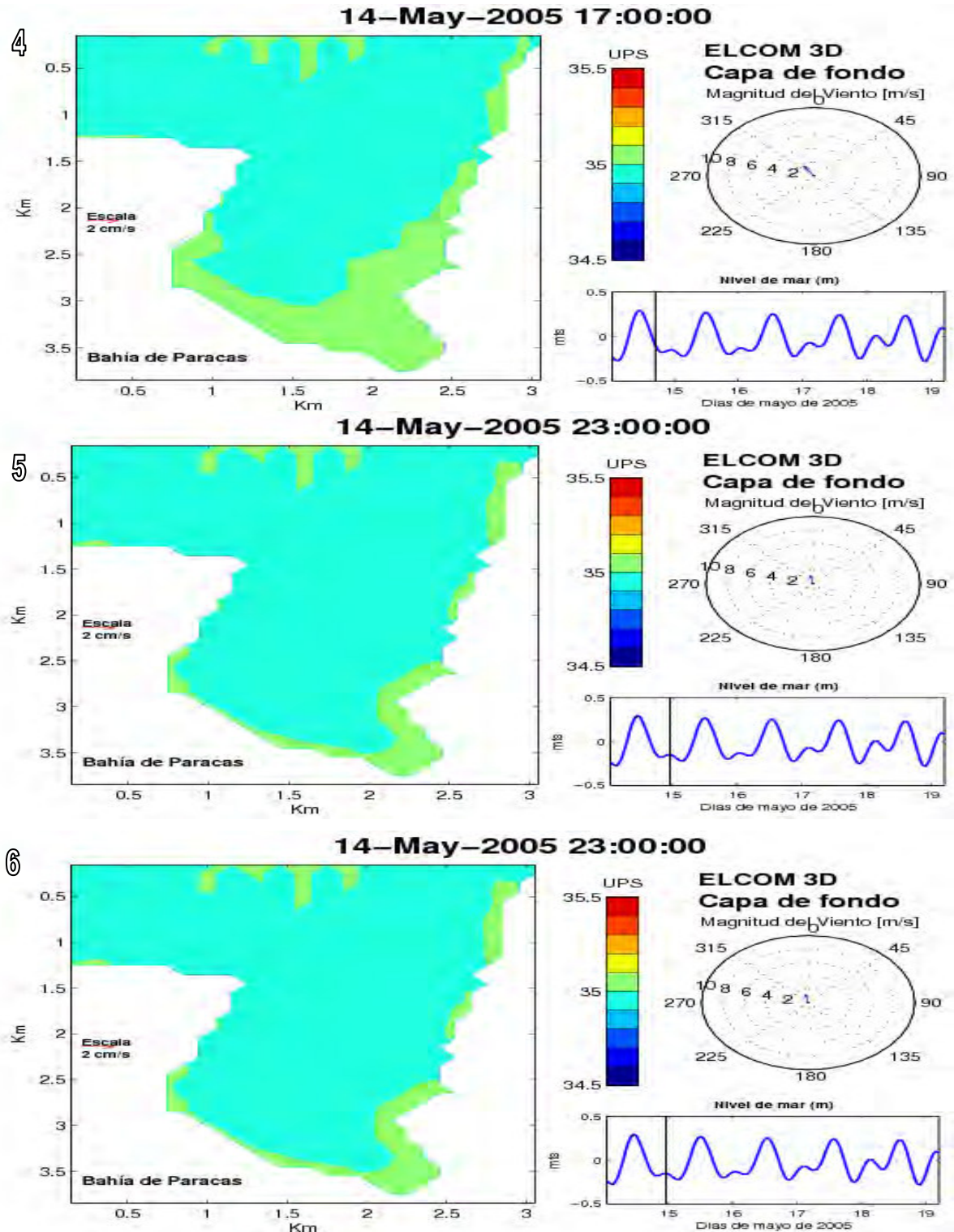


Figura 4.44: Distribución horizontal de la salinidad en la capa de fondo entre las 06:00 14 May-2005 y las 13:00 14 May-2005

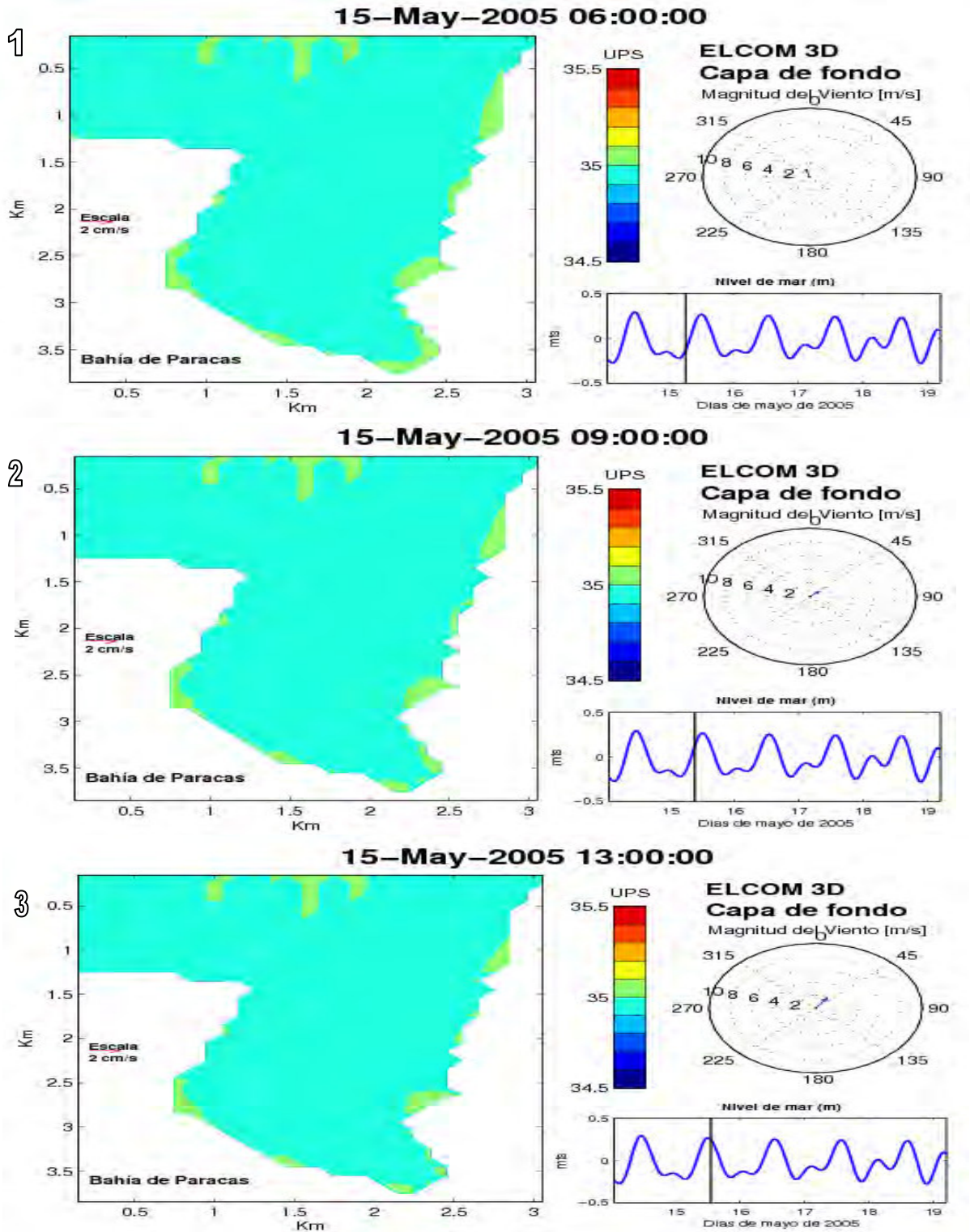


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad



**Figura 4.45: Distribución horizontal de la salinidad en la capa de fondo entre las 17:00 14 May-2005 y las 23:00 14 May-2005**

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad



**Figura 4.46: Distribución horizontal de la salinidad en la capa de fondo entre las 06:00 15 May-2005 y las 13:00 15 May-2005**



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

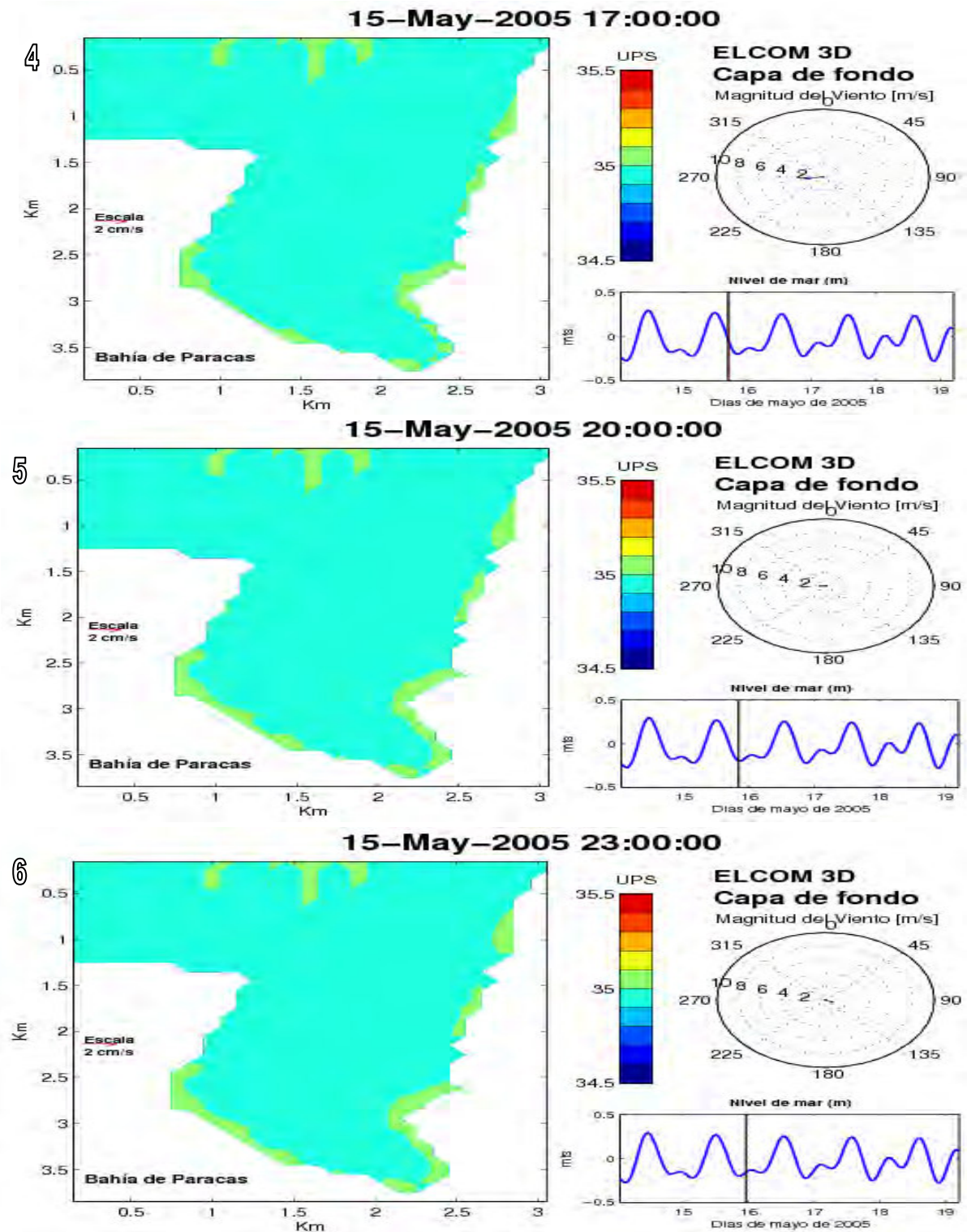
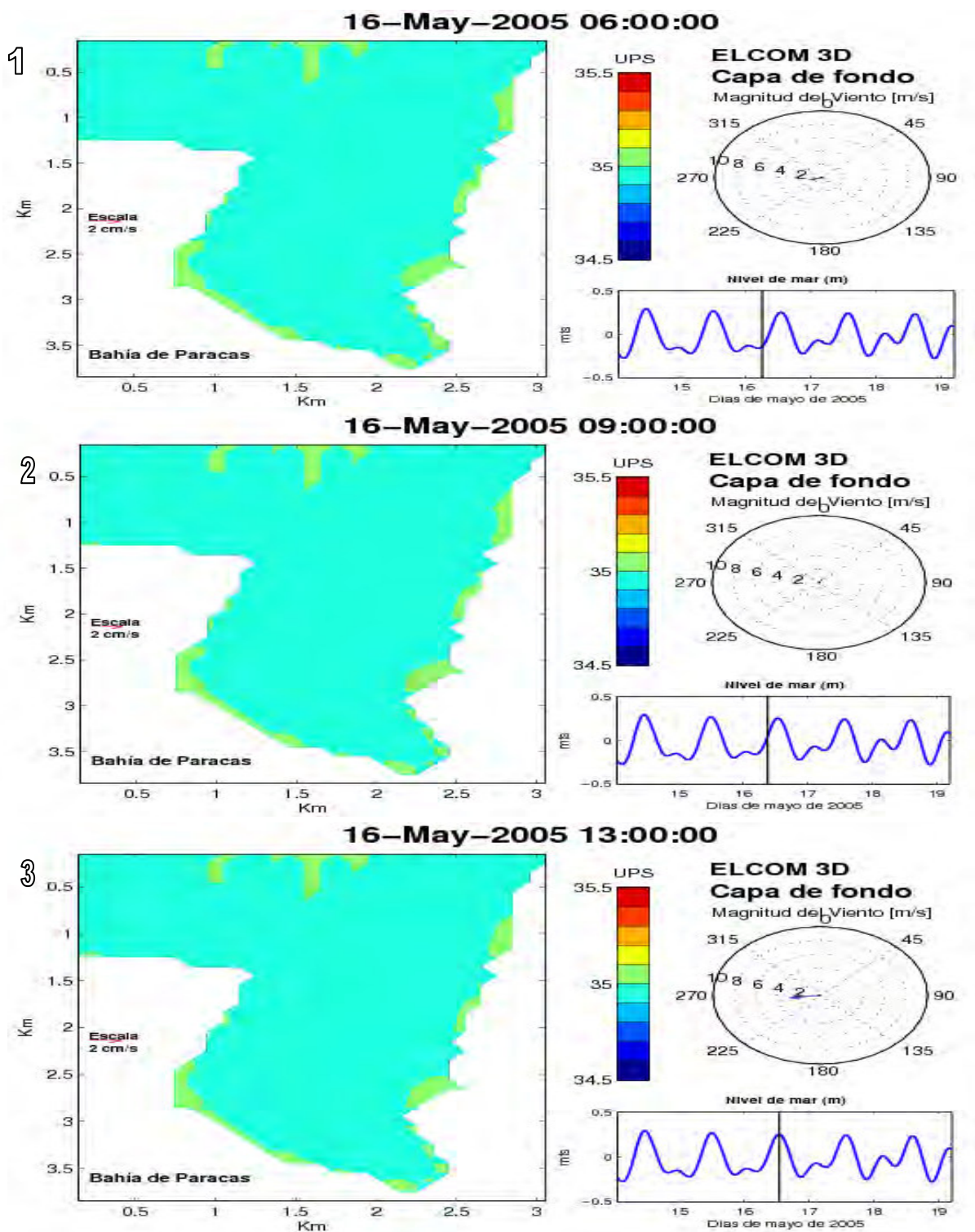


Figura 4.47: Distribución horizontal de la salinidad en la capa de fondo entre las 17:00 15 May-2005 y las 23:00 15 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

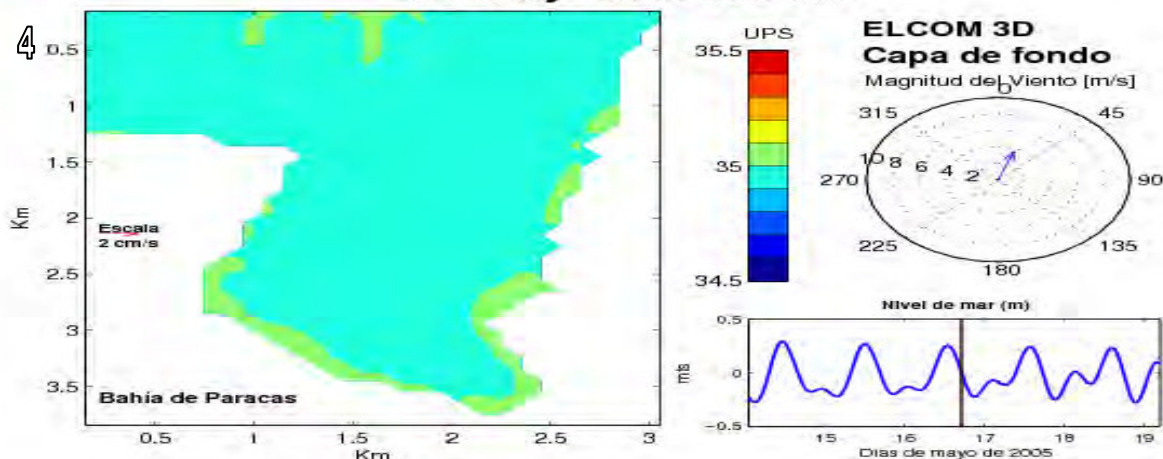


**Figura 4.48: Distribución horizontal de la salinidad en la capa de fondo entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005**

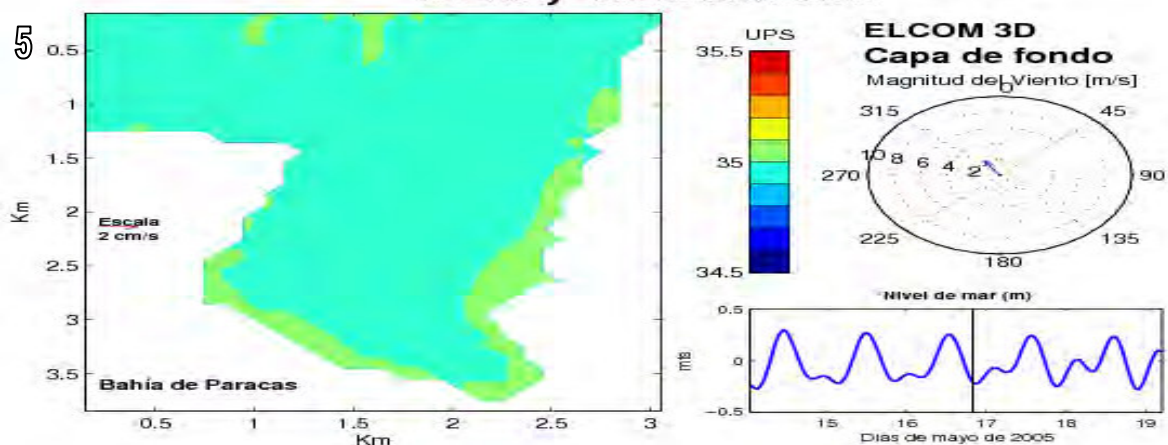


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Salinidad

16-May-2005 17:00:00



16-May-2005 20:00:00



16-May-2005 23:00:00

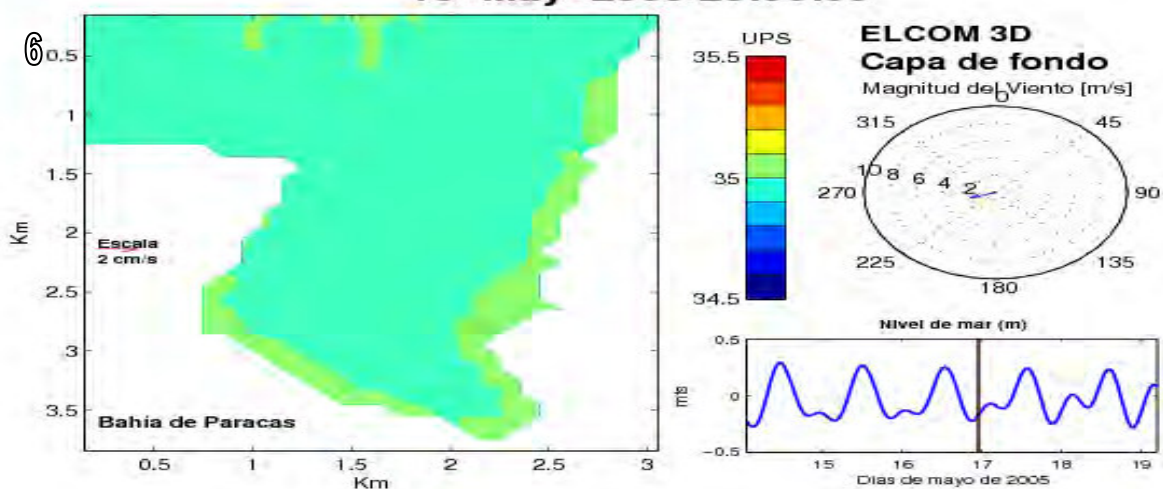


Figura 4.49: Distribución horizontal de la salinidad en la capa de fondo entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005

#### 4.2.4. Densidad

En esta sección se presentan resultados obtenidos con ELCOM, que incluyen una descripción general de la variación espacio-temporal de la densidad simulada en la Bahía.

Las Figuras 4.50 a 4.55 (capa superficial) y Figuras 4.56 a 4.61 (capa de fondo) muestran los resultados generados por ELCOM para las siguientes secciones horizontales: superficie libre y capa de fondo.

Las figuras de esta sección están ordenadas en paneles 1, 2, 3, 4, 5 y 6 que presentan en orden cronológico la variación diurna de la densidad en el sistema. Cada panel está compuesto de tres sub-figuras; en el lado izquierdo de cada panel se presenta la densidad simulada, graficada sobre la distribución horizontal; una barra de color indica la escala e intervalo de la densidad de la simulación; en el lado derecho se presenta dos sub-figuras, en la parte superior se muestra un “compás” de viento (magnitud y dirección) y en la parte inferior el nivel del mar. Cada panel muestra la fecha y hora, así como un indicador en cada sub-figura, que señala en qué estado de marea y viento se encontraba el sistema durante la simulación.

La Figura 4.50 presenta la distribución superficial de la densidad durante la pleamar. Los paneles 1 y 2 muestran la variación diurna del sistema, donde la densidad presentó una variación espacial y temporal entre 24.5 y 25.0 kg/m<sup>3</sup>; en el panel 3 se presenta un núcleo con densidad de 25.2 kg/m<sup>3</sup>; éste se desplaza hacia el interior de la Bahía por la boca de conexión en bajamar (ver Figura 4.51 panel 4). En el panel 6 Figura 4.51 se presenta un núcleo de densidad 25.7 kg/m<sup>3</sup> que viene del Sur, éste se mantiene casi estable durante la simulación del sistema. En la Figura 4.52 panel 1 en bajamar el núcleo de densidad 25.2 kg/m<sup>3</sup> se desplaza hacia el interior de la Bahía con mayor predominancia penetrando la boca de conexión frente a Punta Pejerrey. En la Figura 4.53 panel 6 se nota la presencia de un núcleo de masa de agua con densidad 24.2



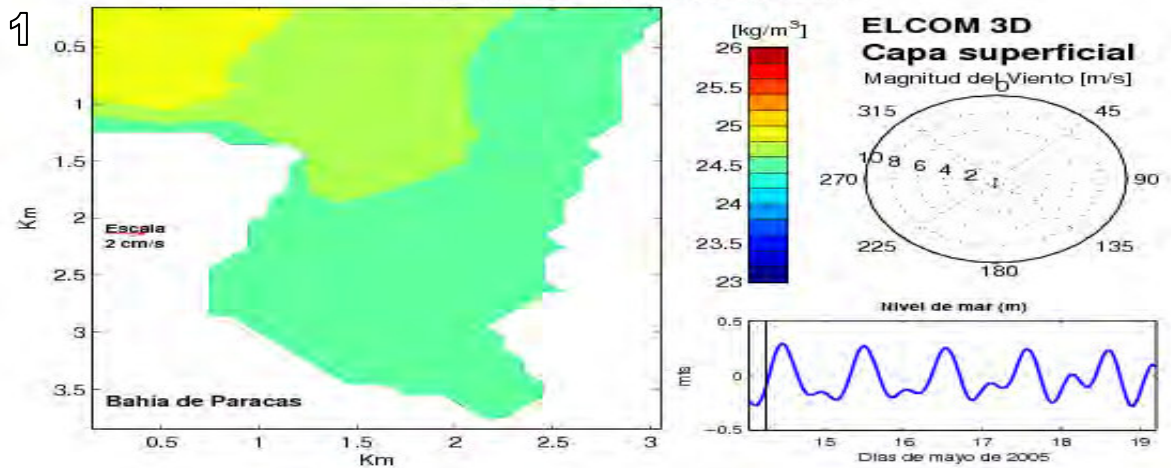
kg/m<sup>3</sup> pegado a la parte somera; éste se mantuvo casi homogéneo hasta el 16-May-2005 (ver Figura 4.54 panel 3).

La estructura de la densidad sugiere poca variabilidad en la superficie en la Bahía de Paracas y en la zona adyacente, por lo que se aprecia espacialmente homogénea a través del tiempo durante la simulación.

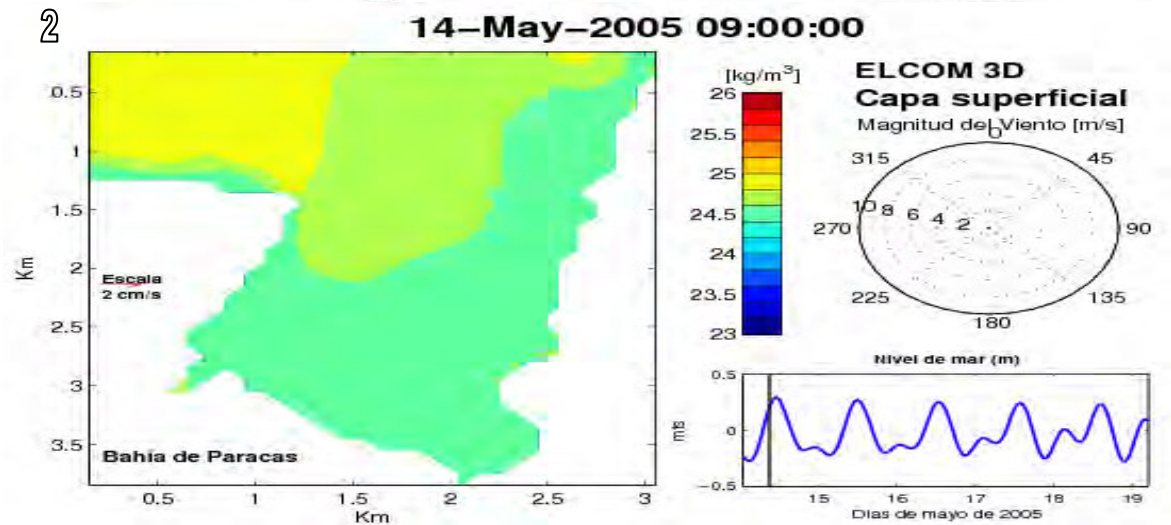
La Figura 4.56 panel 1 muestra la distribución de la densidad en el fondo durante la pleamar. La densidad presentó una variación entre 24.5 y 25.3 kg/m<sup>3</sup>; la pluma de 25.3 kg/m<sup>3</sup> se desplaza hacia el interior de la Bahía panel 2 y 3, presentando una mayor predominancia el día 15-May-2005 (ver Figura 4.58 panel 1, 2 y 3) sin presentar variación durante el transcurso del día (paneles 1 al 6), observándose la presencia de una pluma pegada a la costa por la parte somera de densidad entre 24.7 y 25.0 kg/m<sup>3</sup> durante el bajamar (ver Figura 4.61 paneles 4, 5 y 6), que muestra la diferencia entre zonas someras y profundas. Las densidades en el fondo fueron máximas en la boca y zona Norte de la Bahía a profundidades mayores a 10 m, debido a que la zona de convergencia de los flujos del Sur con parte del flujo proveniente del Norte cambian con la dirección del viento.

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

14-May-2005 06:00:00



14-May-2005 09:00:00



14-May-2005 13:00:00

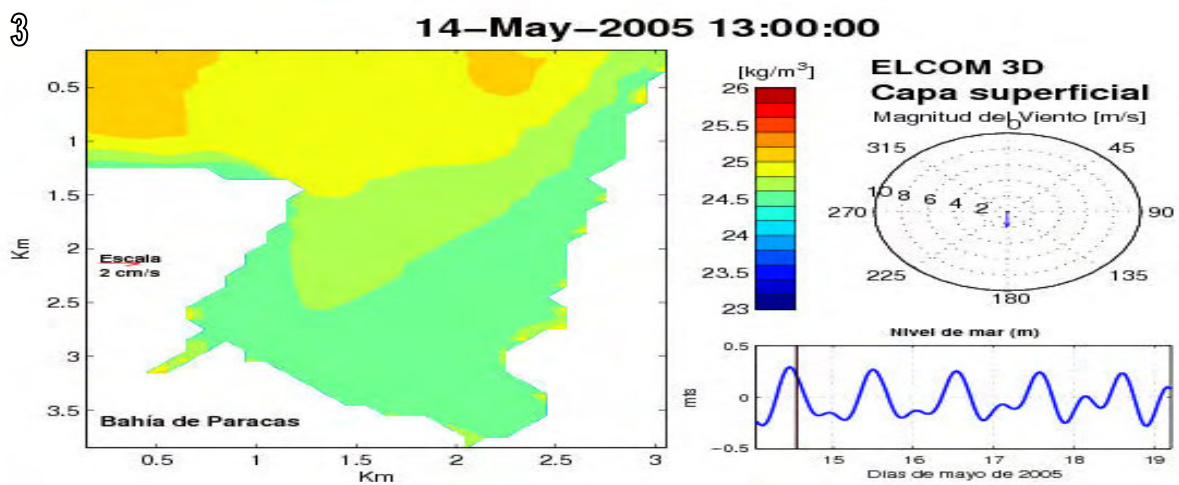
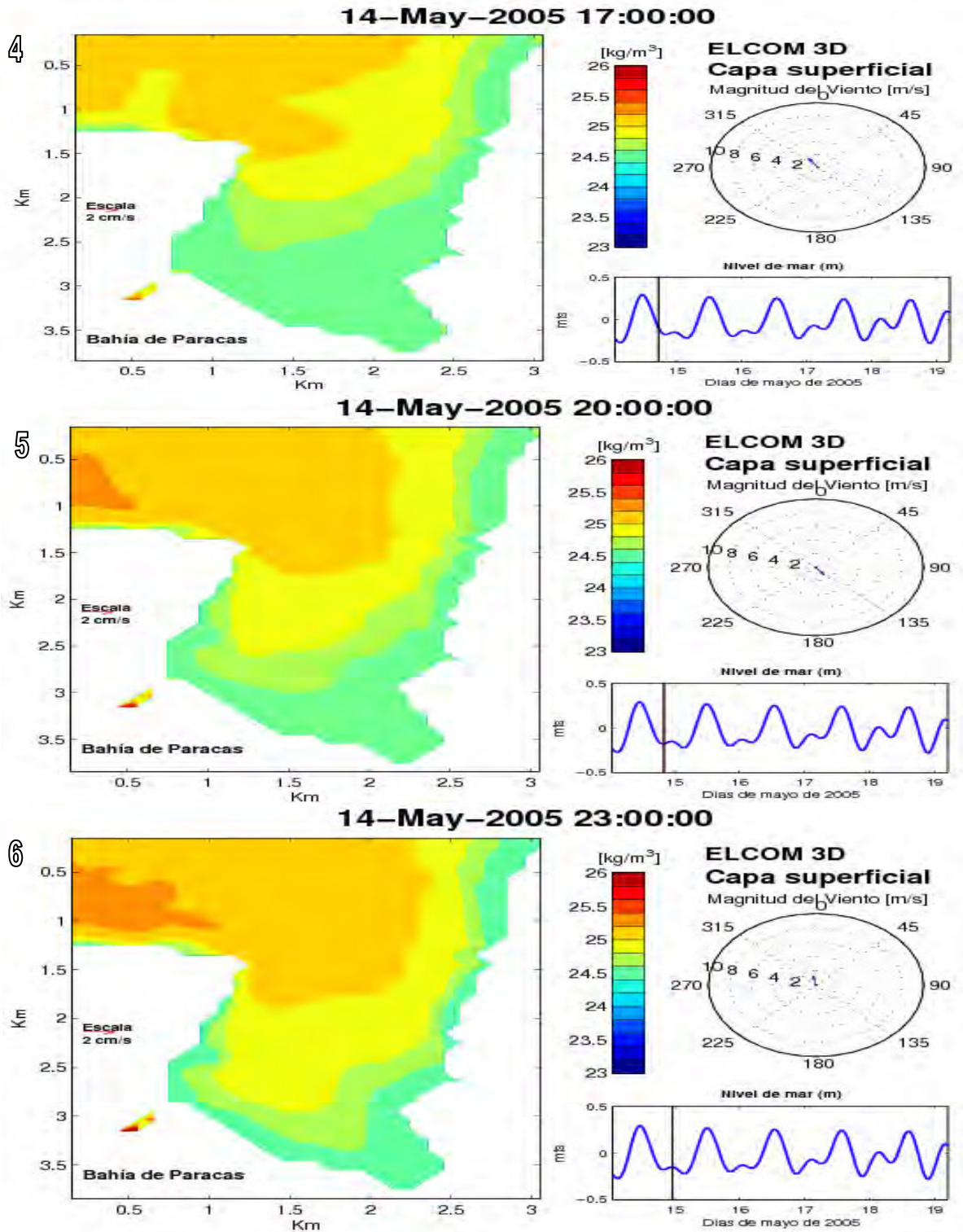


Figura 4.50: Distribución horizontal de la densidad en la capa superficial entre las 06:00 14-May-2005 y las 13:00 14-May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

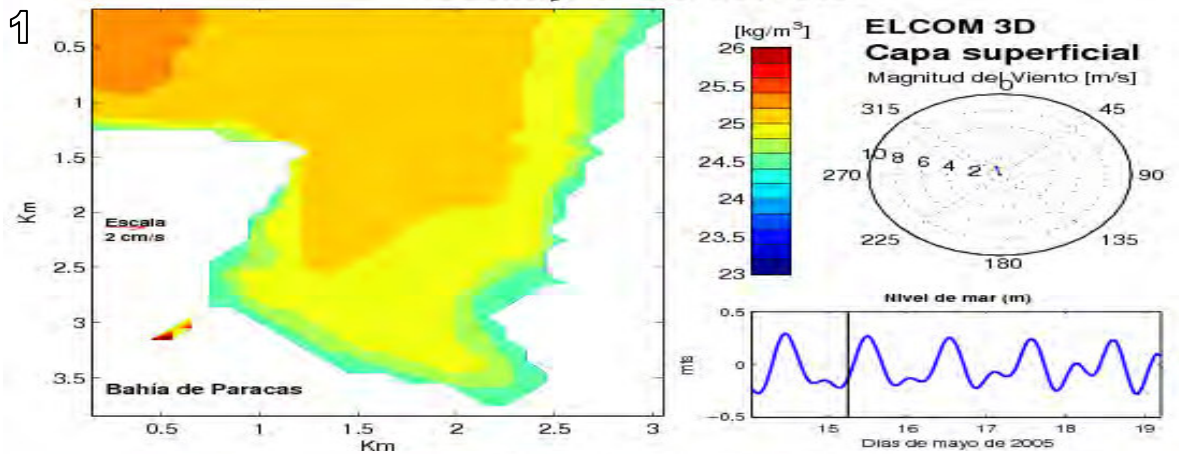


**Figura 4.51: Distribución horizontal de la densidad en la capa superficial entre las 17:00 14-May-2005 y las 23:00 14-May-2005**

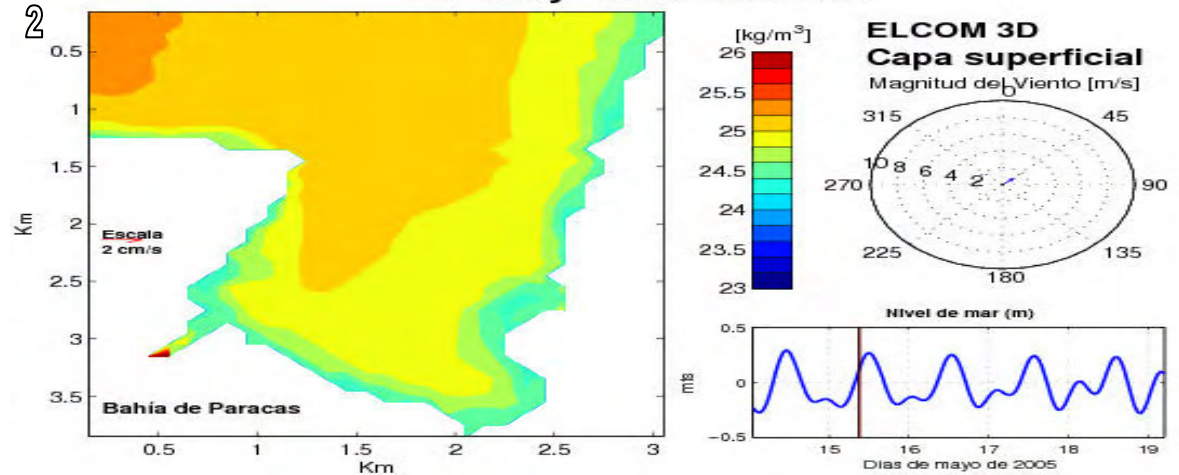


## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

15-May-2005 06:00:00



15-May-2005 09:00:00



15-May-2005 13:00:00

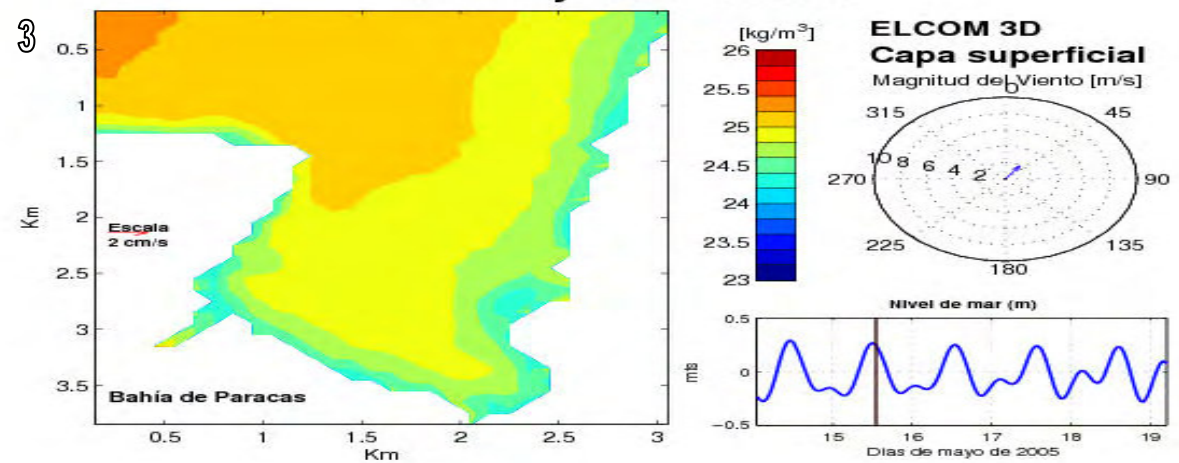


Figura 4.52: Distribución horizontal de la densidad en la capa superficial entre las 06:00 15 May 2005 y las 13:00 15 May 2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

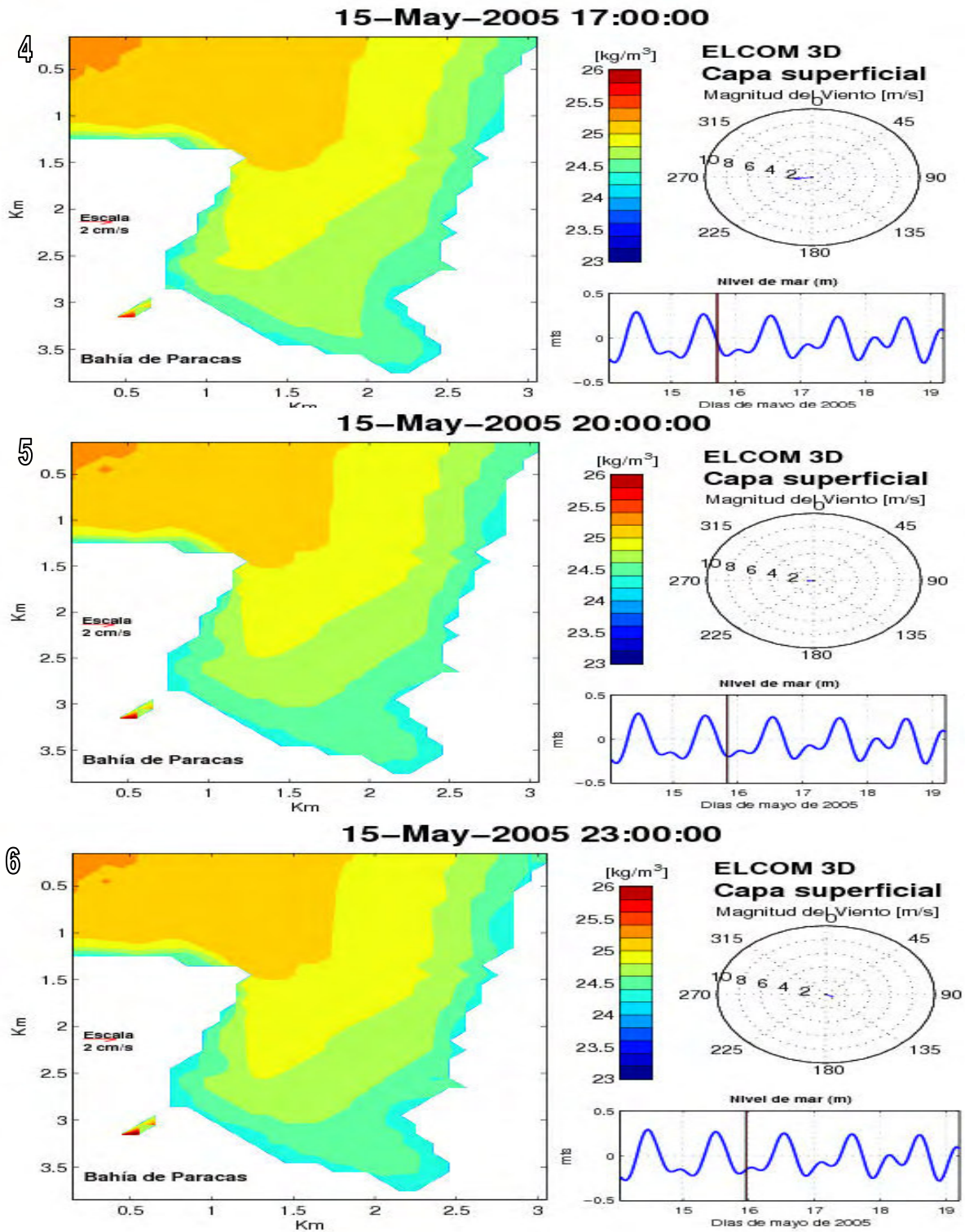


Figura 4.53: Distribución horizontal de la densidad en la capa superficial entre las 17:00 15 May 2005 y las 23:00 15 May 2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

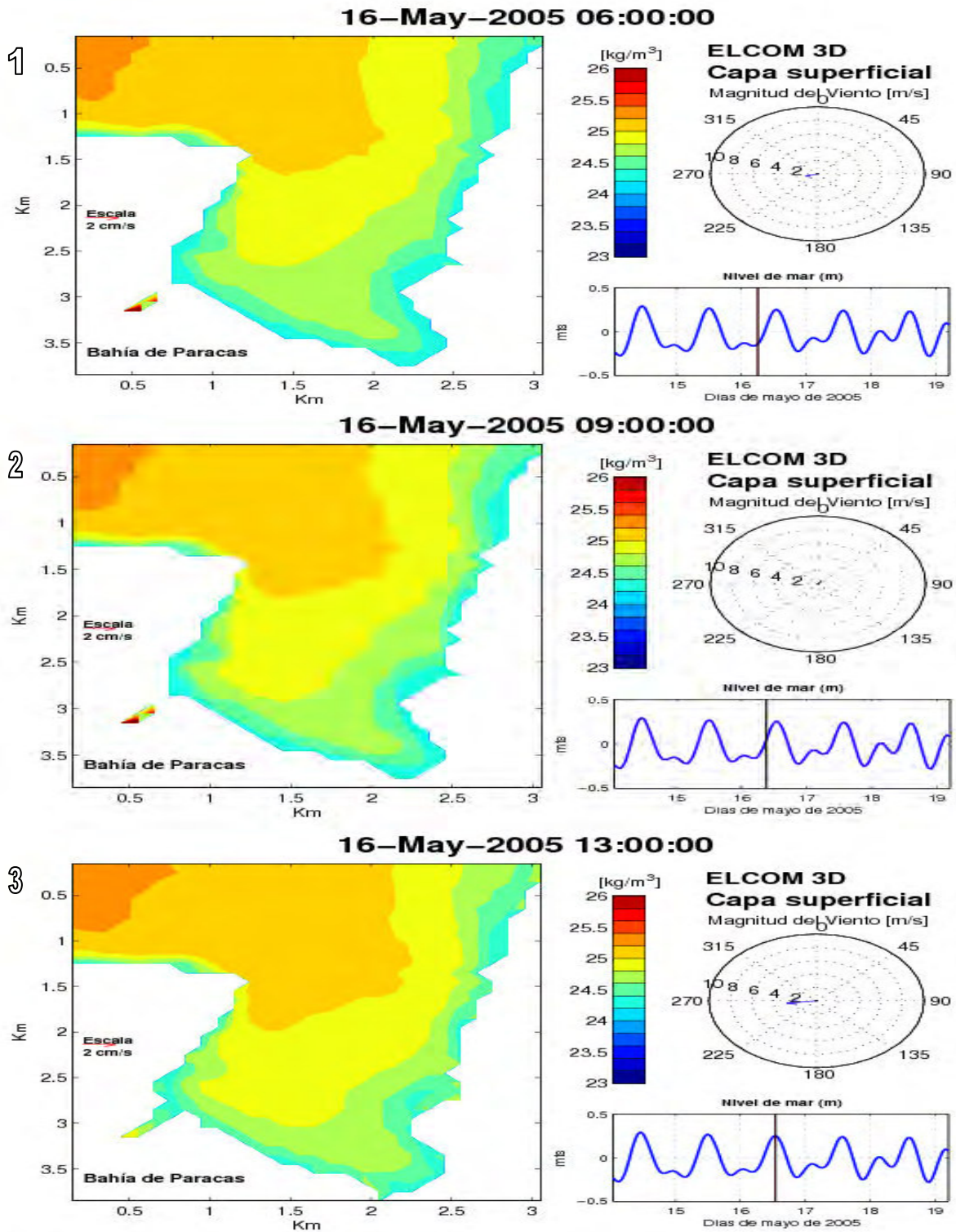


Figura 4.54: Distribución horizontal de la densidad en la capa superficial entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

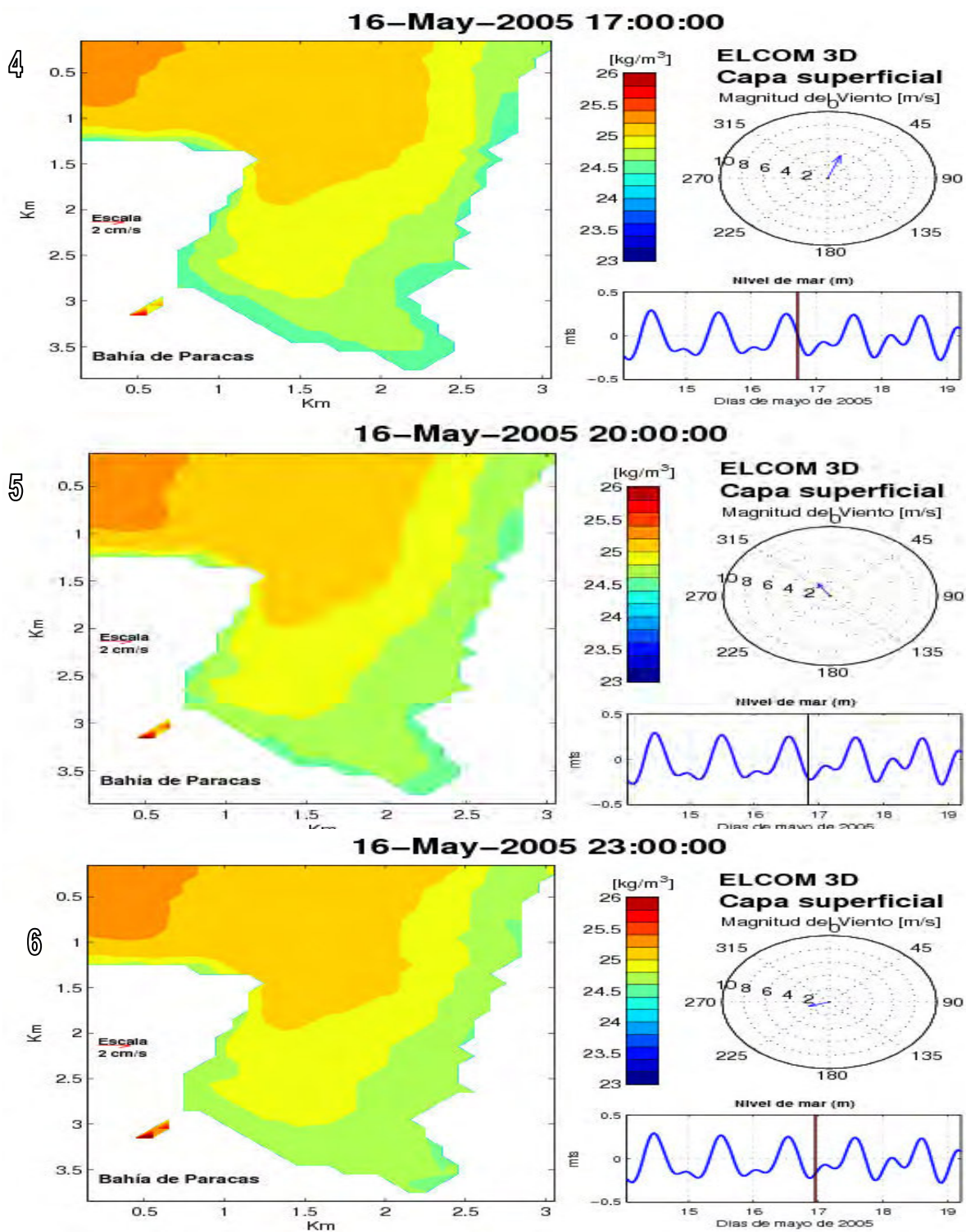
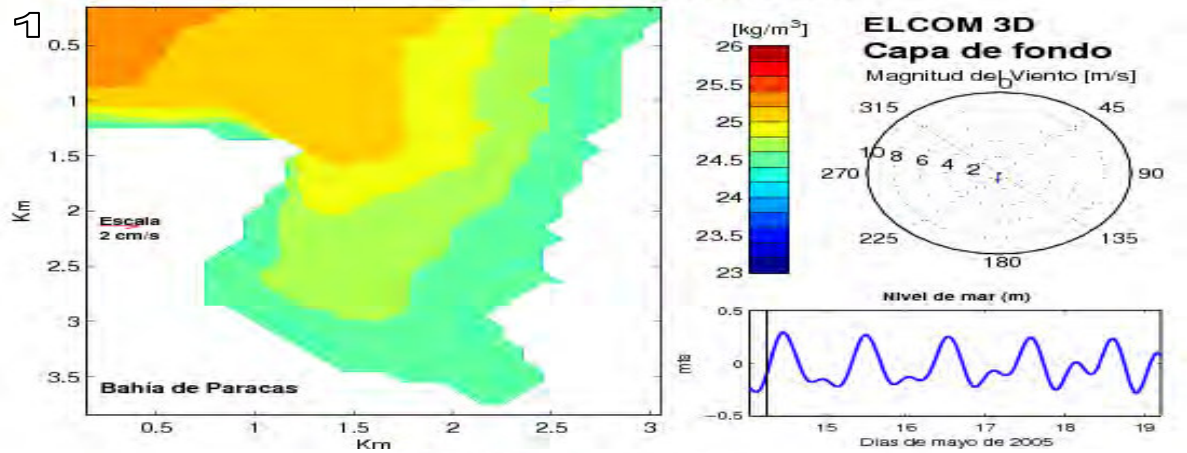


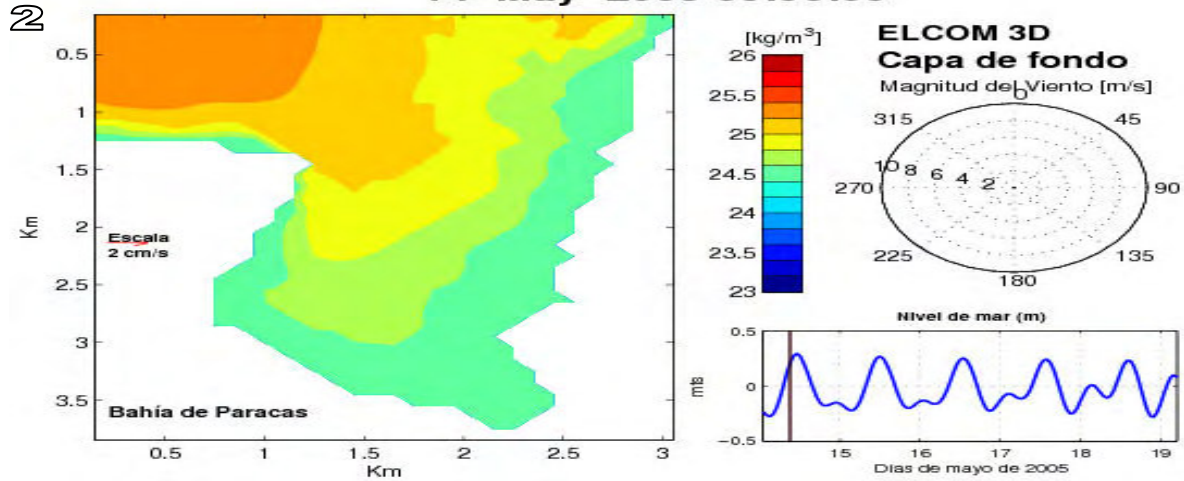
Figura 4.55: Distribución horizontal de la densidad en la capa superficial entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

14-May-2005 06:00:00



14-May-2005 09:00:00



14-May-2005 13:00:00

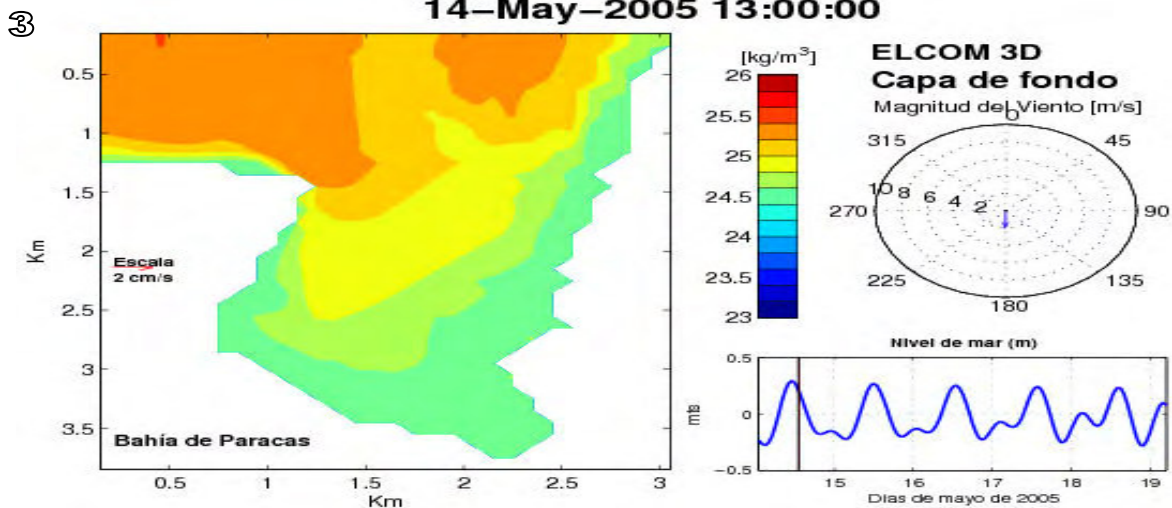


Figura 4.56: Distribución horizontal de la densidad en la capa de Fondo entre las 06:00 14 May-2005 y las 13:00 14 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

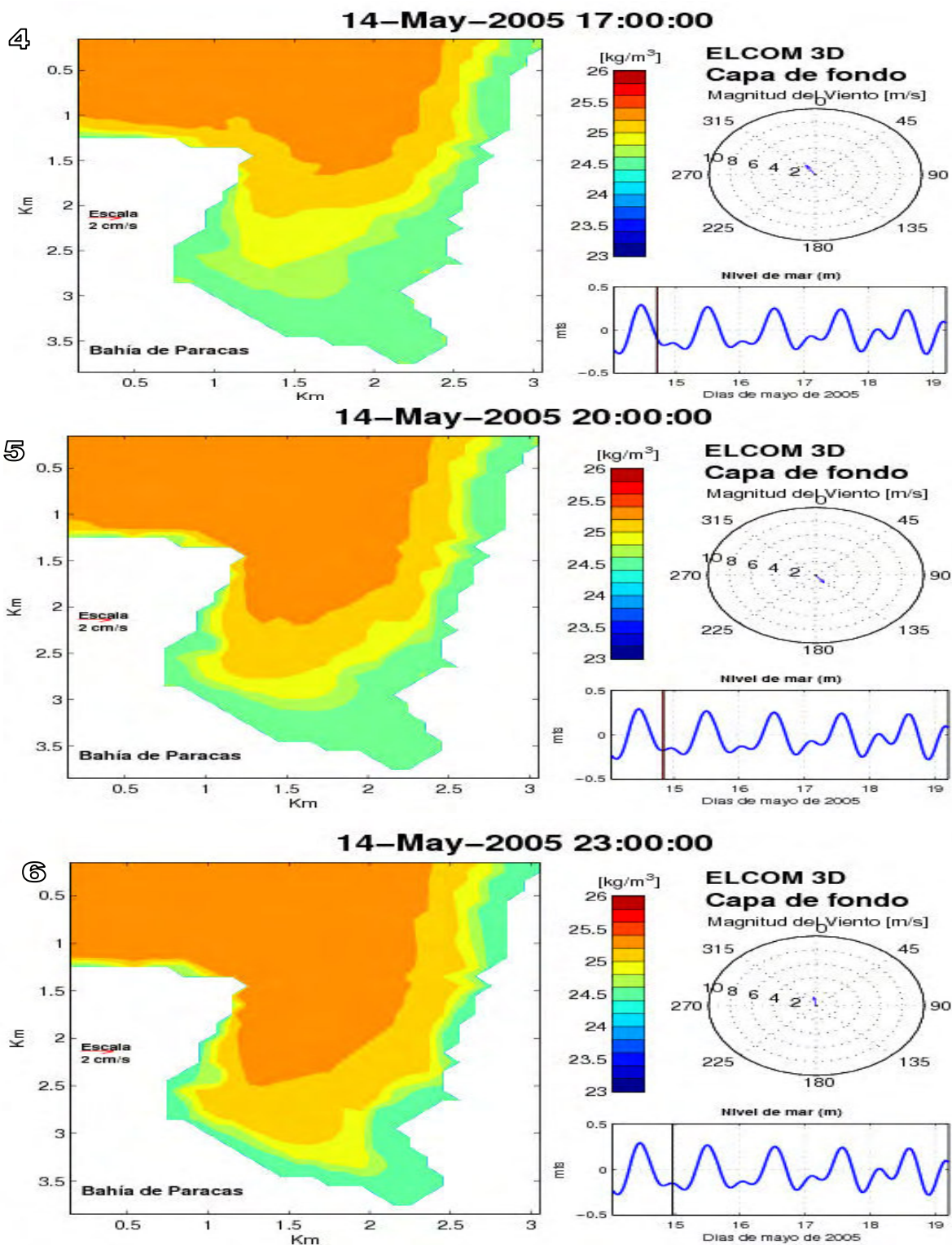
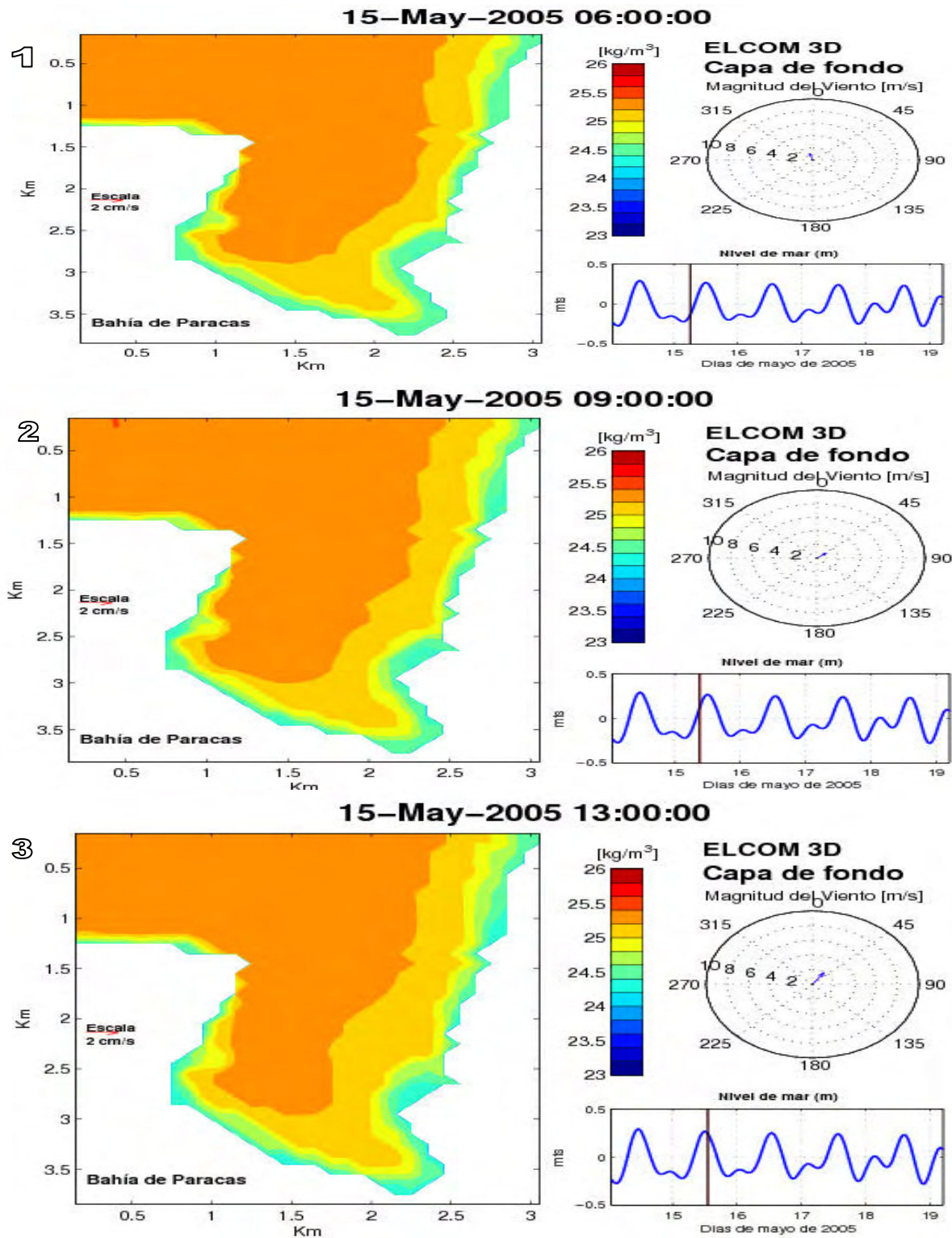


Figura 4.57: Distribución horizontal de la densidad en la capa de fondo entre las 17:00 14 May-2005 y las 23:00 14 May-2005



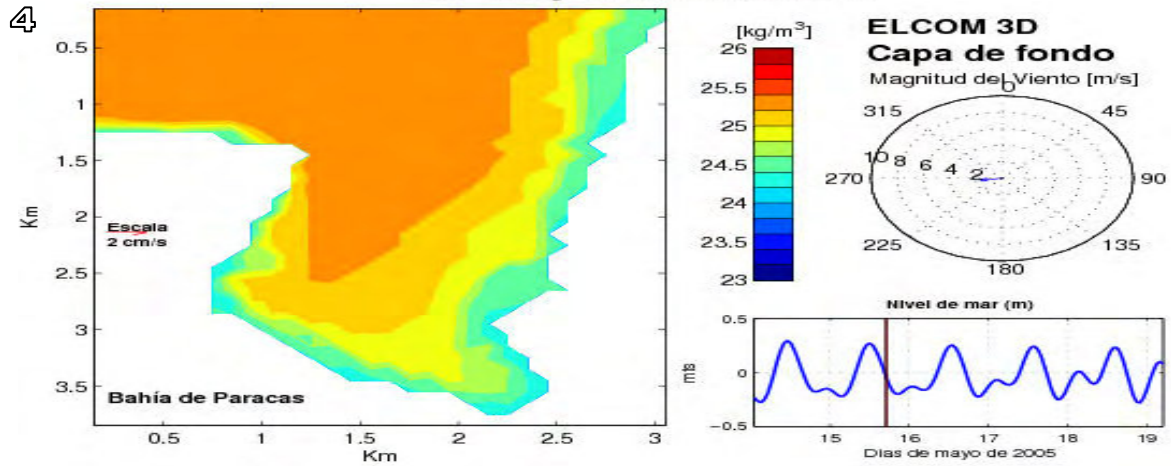
## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad



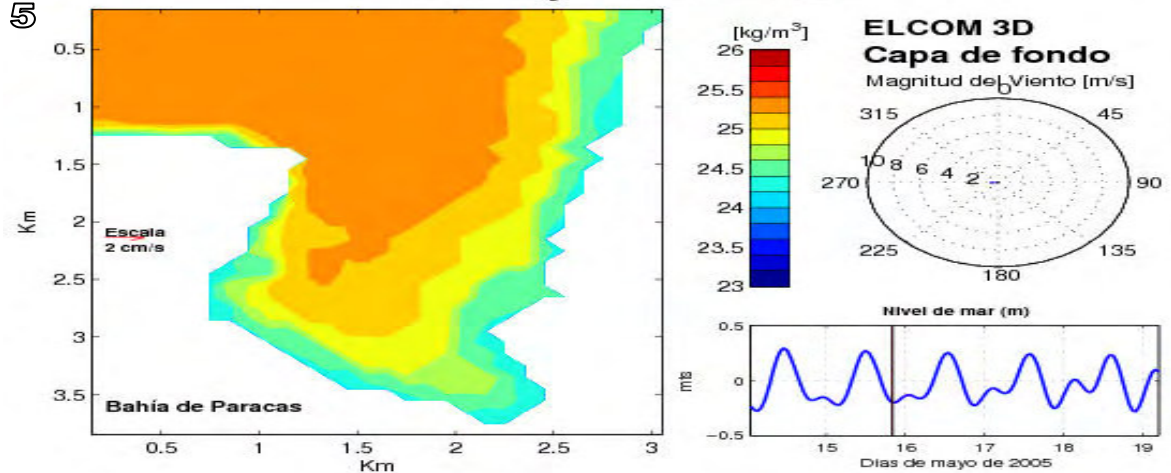
**Figura 4.58: Distribución horizontal de la densidad en la capa de fondo entre las 06:00 15 May-2005 y las 13:00 15 May-2005**

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

15-May-2005 17:00:00



15-May-2005 20:00:00



15-May-2005 23:00:00

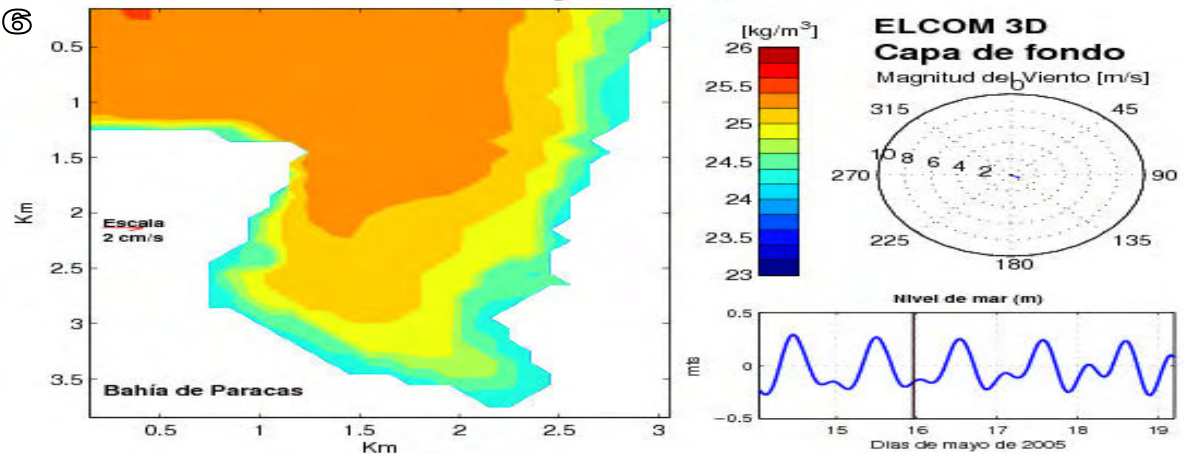
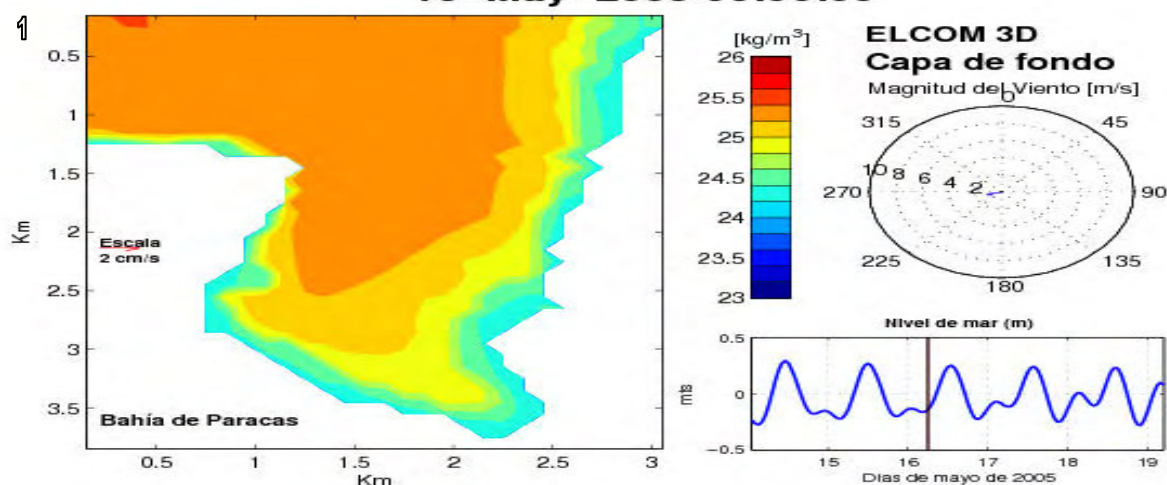


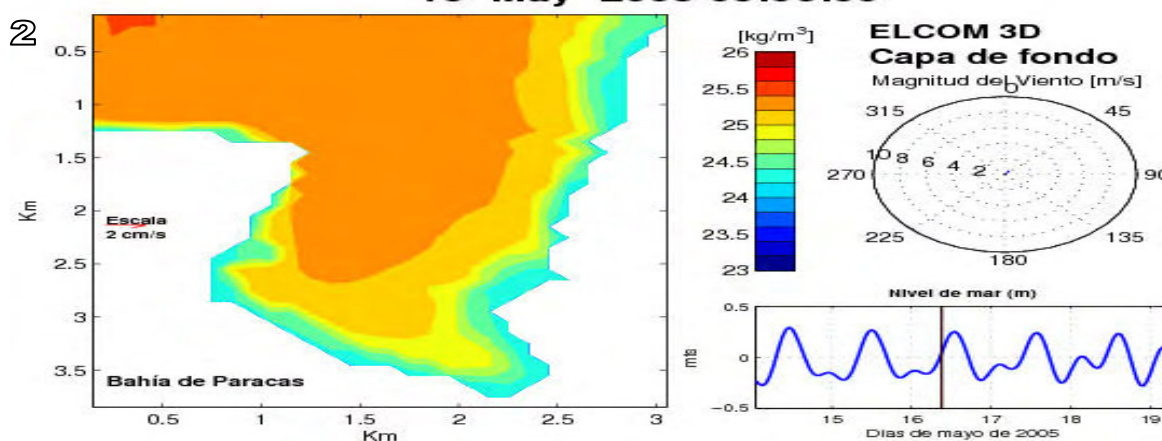
Figura 4.59: Distribución horizontal de la densidad en la capa de fondo entre las 17:00 15 May-2005 y las 23:00 15 May-2005

## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

16-May-2005 06:00:00



16-May-2005 09:00:00



16-May-2005 13:00:00

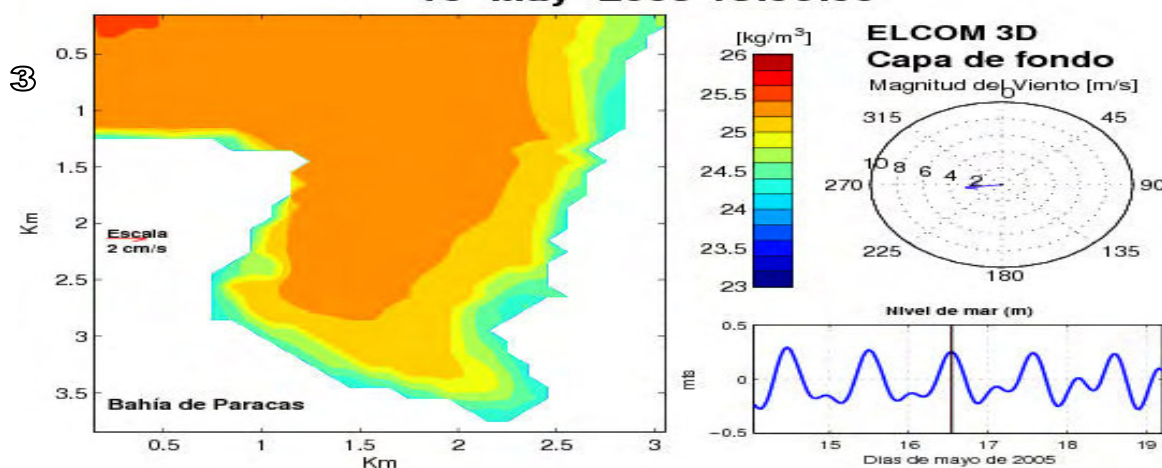


Figura 4.60: Distribución horizontal de la densidad en la capa de fondo entre las 06:00 16 May-2005 y las 13:00 16 May-2005



## Bahía de Paracas. Resultados ELCOM 3D. Densidad

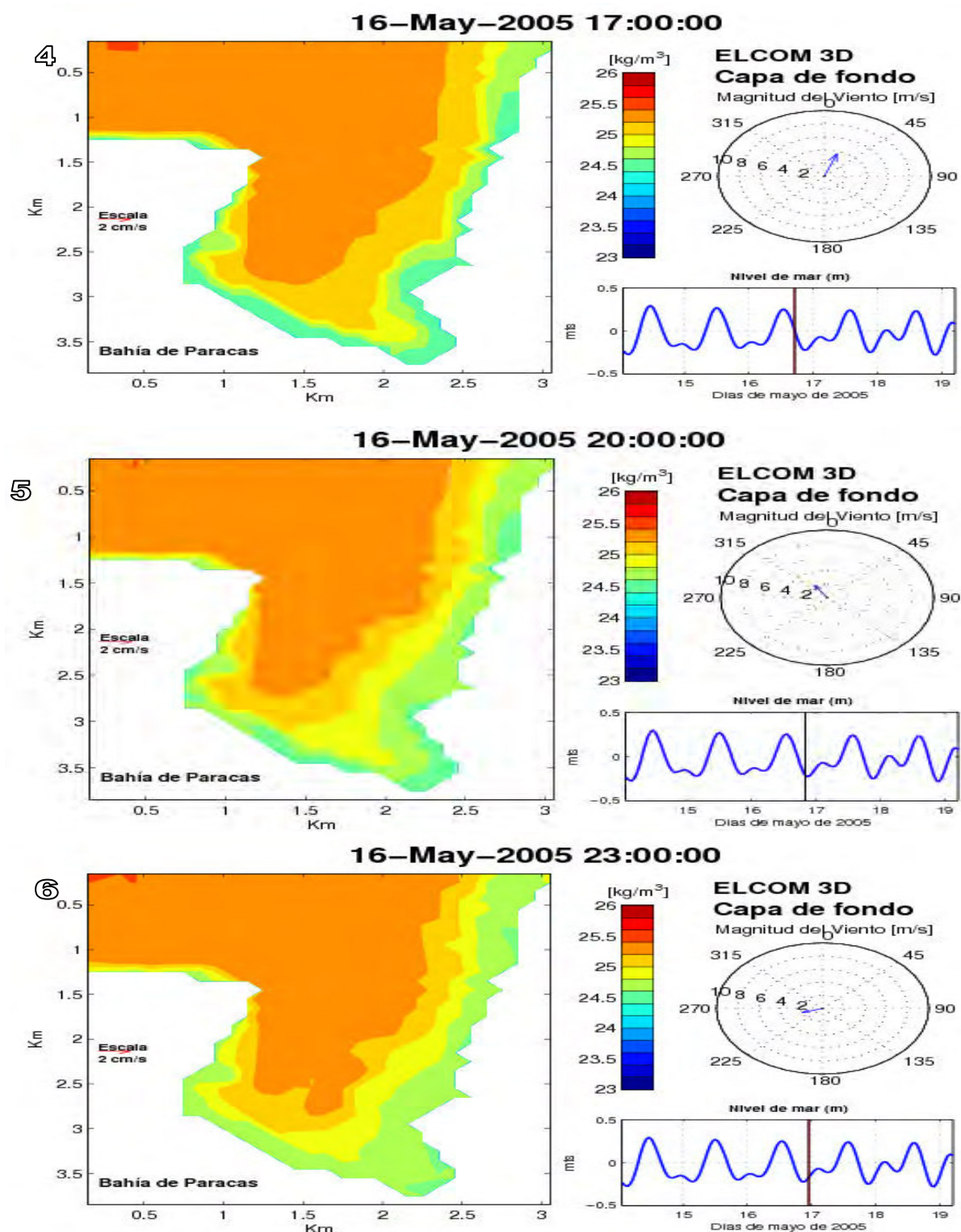


Figura 4.61: Distribución horizontal de la densidad en la capa de fondo entre las 17:00 16 May-2005 y las 23:00 16 May-2005

## Validación

Con la finalidad de verificar el buen funcionamiento del modelo se realizaron comparaciones entre las variables medidas en la Bahía de Paracas y las simuladas con el modelo. La validación se realizó de acuerdo a la disponibilidad de los datos de la campaña; se hicieron comparaciones entre las variables medidas en el campo con las obtenidas en las simulaciones, seleccionando la que tenga mayor representatividad y que sea más cercano a la realidad. Se ha realizado solo comparaciones entre la temperatura y corrientes debido a que muestran mayor dinámica en la zona. Se encontró que la variación vertical de la salinidad es mínima, por lo que se puede asumir que la estratificación observada es debido a la variación vertical de la temperatura.

La Figura 4.62 muestra la distribución vertical de los parámetros oceanográficos: en el panel superior la temperatura, en el panel del intermedio la salinidad y en el panel inferior la densidad en la boca de conexión medida con el CTD sólo para efectos de comparación; se considera el panel superior de la sección vertical para la temperatura y se compara con la simulada con el modelo (Figura 4.63); tanto los datos de campo para la temperatura como la simulación muestran una tendencia a niveles diferenciados para cada valor de temperatura en la vertical, observándose un cambio en la temperatura a partir de los 5 m de profundidad, La Figura 4.64 muestra la distribución vertical de los parámetros oceanográficos: en el panel superior la temperatura, en el panel intermedio la salinidad y en el panel inferior la densidad frente a Paracas en la parte central de la Bahía y se compara con la simulación obtenida que se muestra en la Figura 4.65; tanto los datos de campo para la temperatura como la simulación muestran una tendencia a capas bien diferenciadas para cada valor de temperatura en la vertical, observándose un cambio en la temperatura a partir de los 2 m de profundidad.

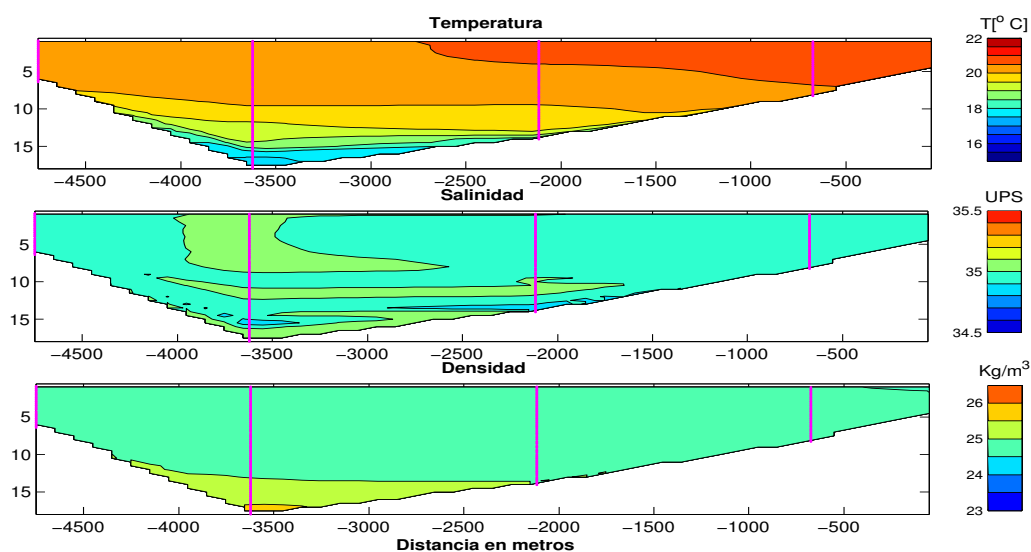
Las Figuras 4.66 y 4.67 muestran la variación de la velocidad de las corrientes obtenidas en la campaña de mediciones descrita en la sección 3.2.2, medidas con el ADCP adaptado a la embarcación; en cada figura se presenta cuatro paneles con resultados obtenidos para la velocidad de las corrientes a dos, cuatro, seis y ocho metros de profundidad, promediados en la vertical para cada capa.

La Figura 4.68 muestra la comparación de la velocidad medida con el ADCP el día 15 de mayo del 2005 y la simulada con el modelo; ésta presenta un panel que muestra un sub-panel para la marea en el instante de simulación y otro para el promedio vertical de la velocidad. De la comparación se observa que la velocidad simulada presentó la misma tendencia que los datos medidos.

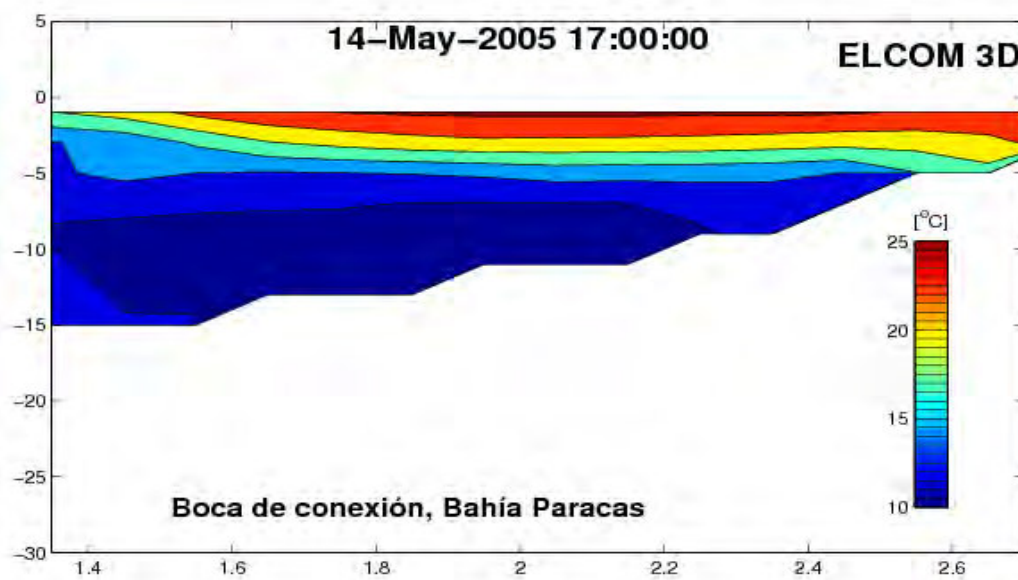
La Figura 4.69 a) muestra la velocidad medida en un punto con el correntómetro Anderaa a 2 m de profundidad promediado en la vertical, y la Figura 4.69 b) muestra una climatología de corrientes en la Bahía para un viento uniforme, que al ser comparada con la simulación obtenida con el modelo (Figura 4.68) muestra la misma tendencia que los datos observados.

Las Figuras 4.70 y 4.71 muestran una comparación entre las simulaciones realizadas con el modelo POM y ELCOM. La simulación realizada con ELCOM que es un modelo de pequeña escala muestra la dinámica al interior de la Bahía, que fue forzada con series de variables meteorológicas y marea simultáneamente, mientras que la simulación con el modelo POM es sólo con viento uniforme y muestra la dinámica a una escala mayor no mostrando la dinámica al interior de la Bahía; en el modelo POM se uso una grilla de 390 m mientras que en el modelo ELCOM una grilla de 100 m; por eso ELCOM mostró mejores resultados en la simulación de la dinámica costera al interior de la Bahía.

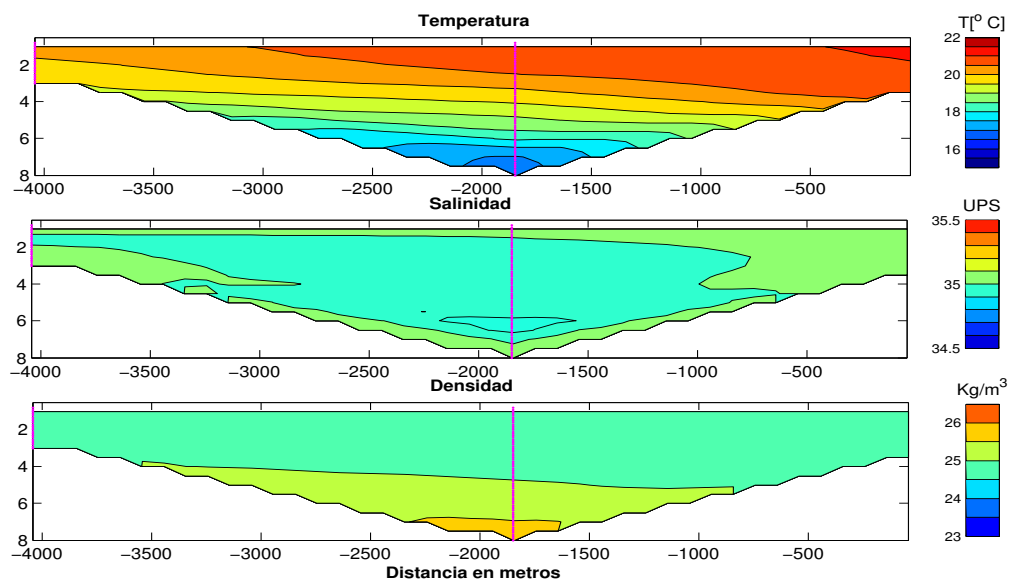
En general durante esta campaña la simulación presentó una tendencia con los datos medidos de temperatura y velocidad.



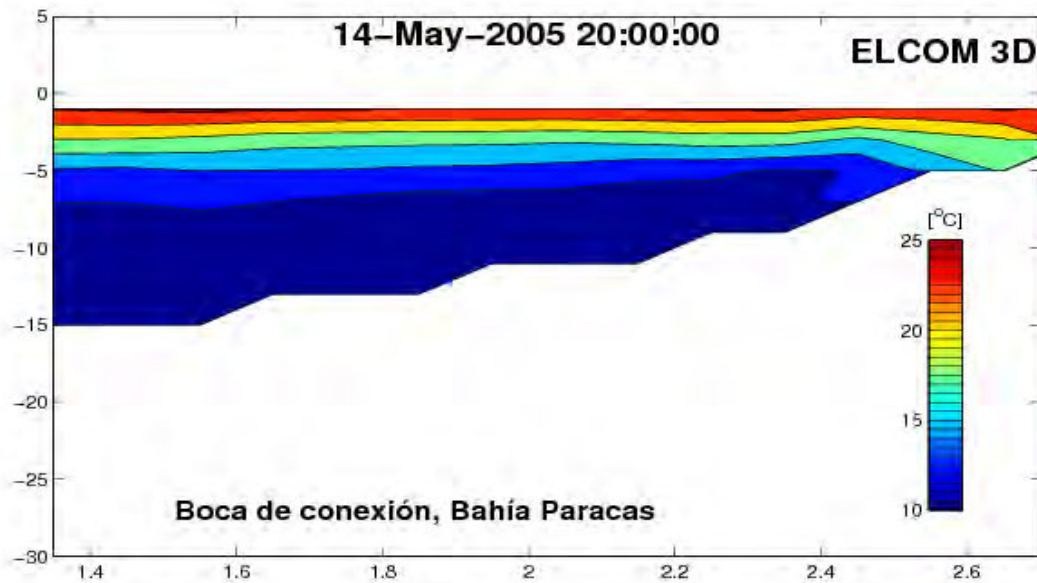
**Figura 4.62. Distribución vertical de parámetros oceanográficos frente a Punta Pejerrey. Estaciones 36,37, 38, 39 y 40**



**Figura 4.63. Simulación numérica en la boca de conexión.**

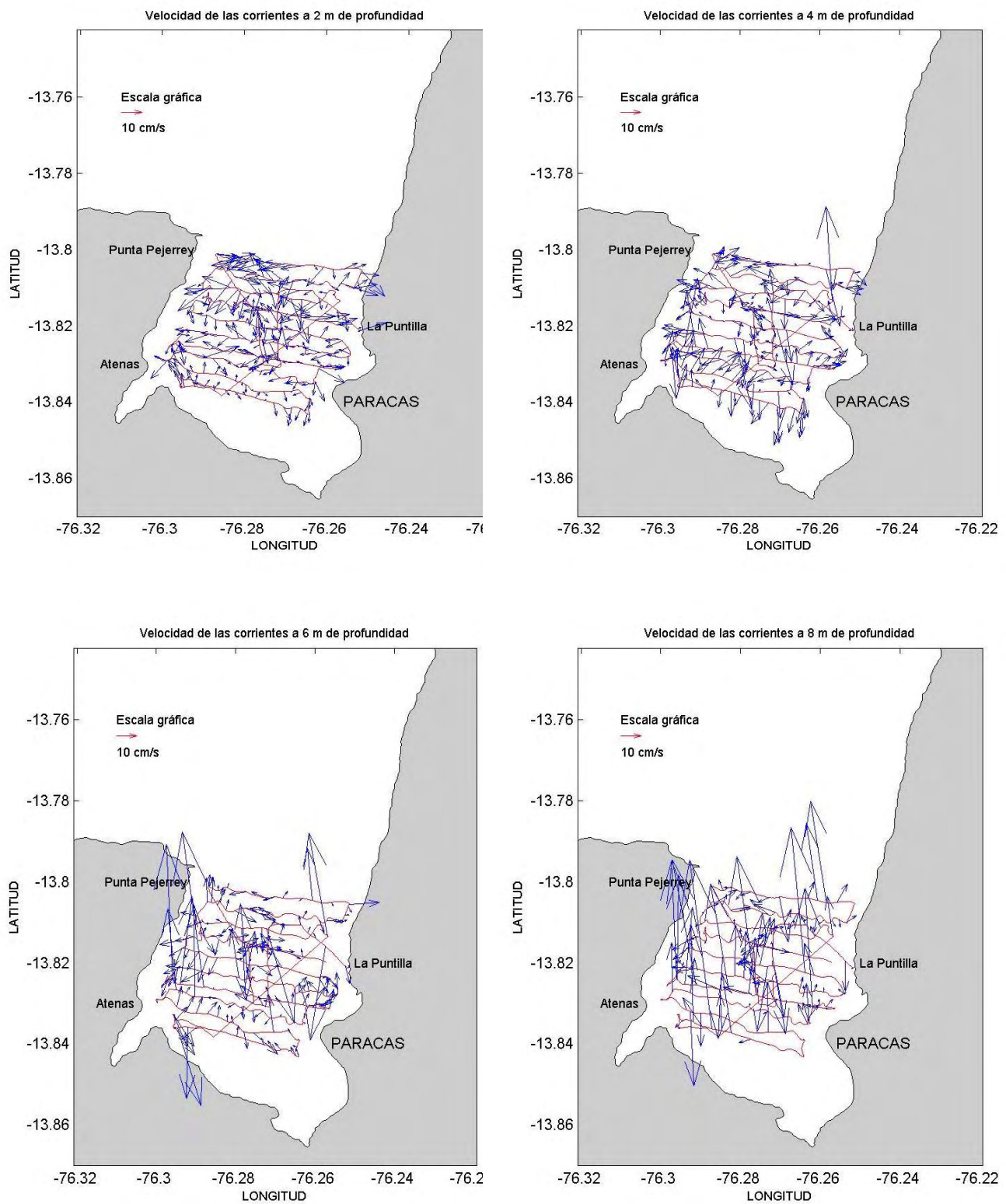


**Figura 4.64. Distribución vertical de parámetros oceanográficos frente a Paracas. Estaciones 12, 13 y 14.**

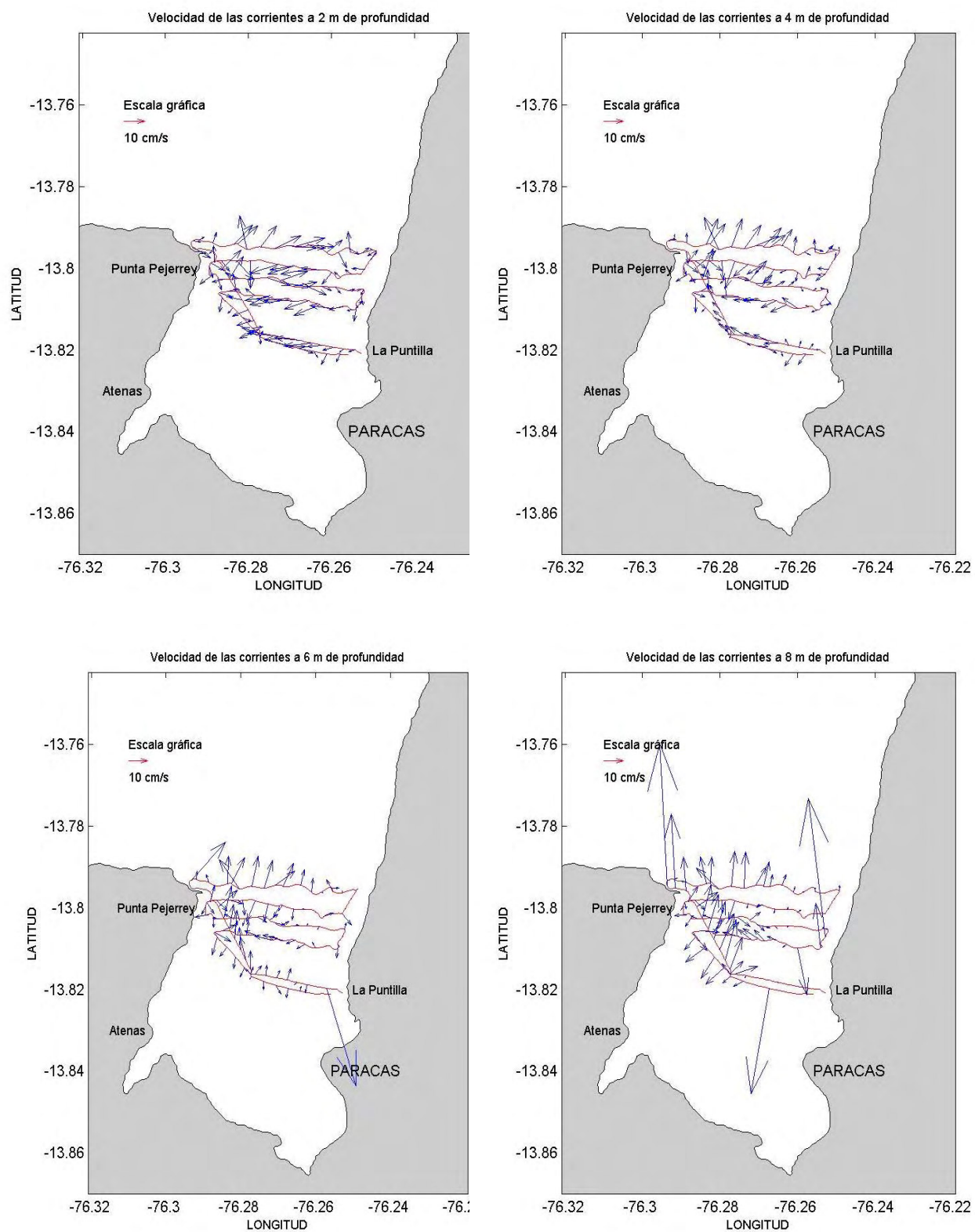


**Figura 4.65. Simulación numérica en el medio de la Bahía.**

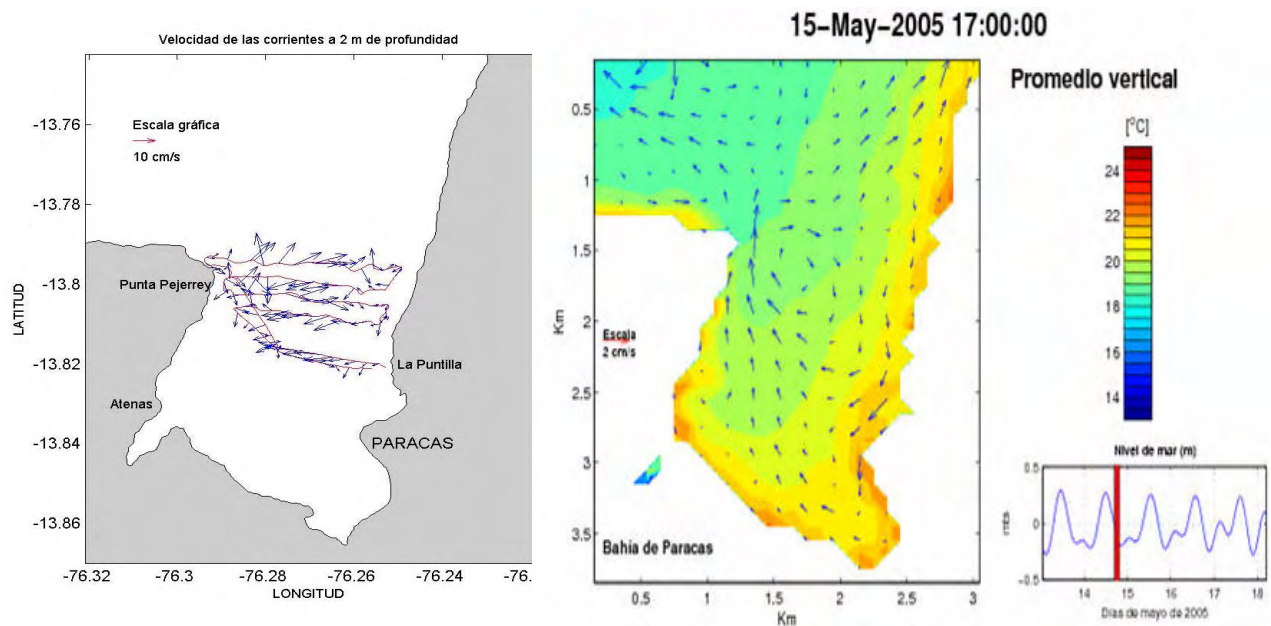




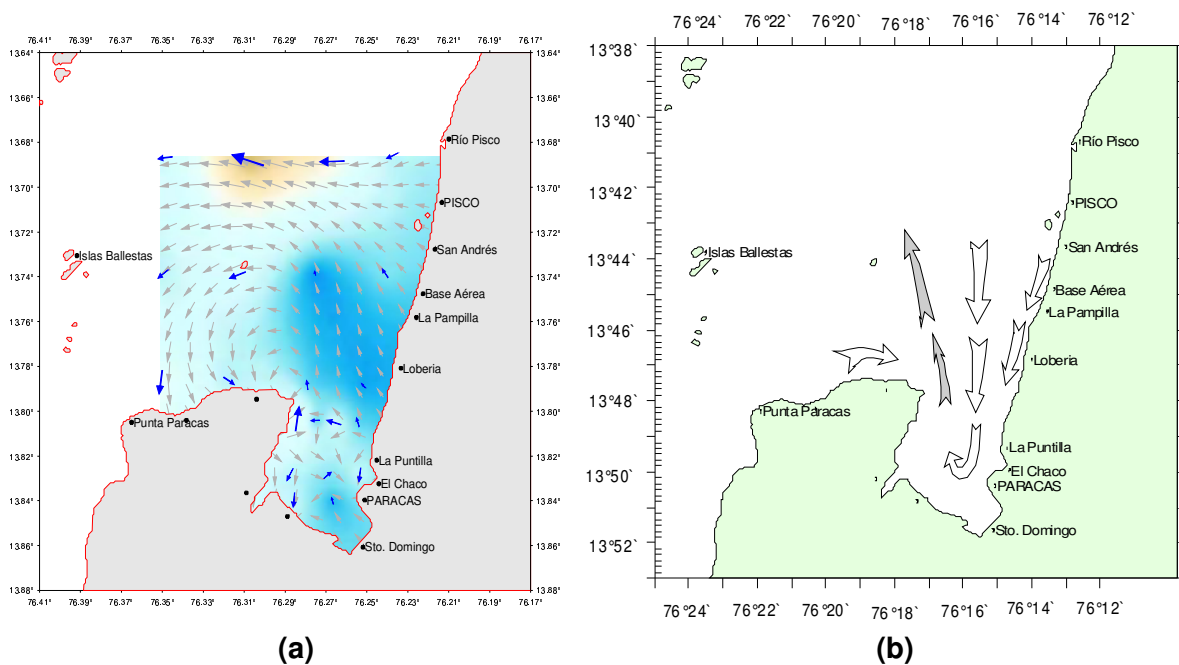
**Figura 4.66. Velocidades de las corrientes a diferentes profundidades (2, 4, 6, y 8 m), día 14/05/2005.**



**Figura 4.67. Velocidad de las corrientes a diferentes profundidades (2, 4, 6 y 8 m), día 15/05/2005**



**Figura 4.68. Comparación de la velocidad de la corriente a dos metros de profundidad con la simulada promediada en la vertical para el día 15/05/2005.**



**Figura 4.69. Velocidad de la corriente marina a) Medida con un correntómetro Andraea para 2 m de profundidad. b) climatología de las corrientes para un viento constante de 5 cm/s.**



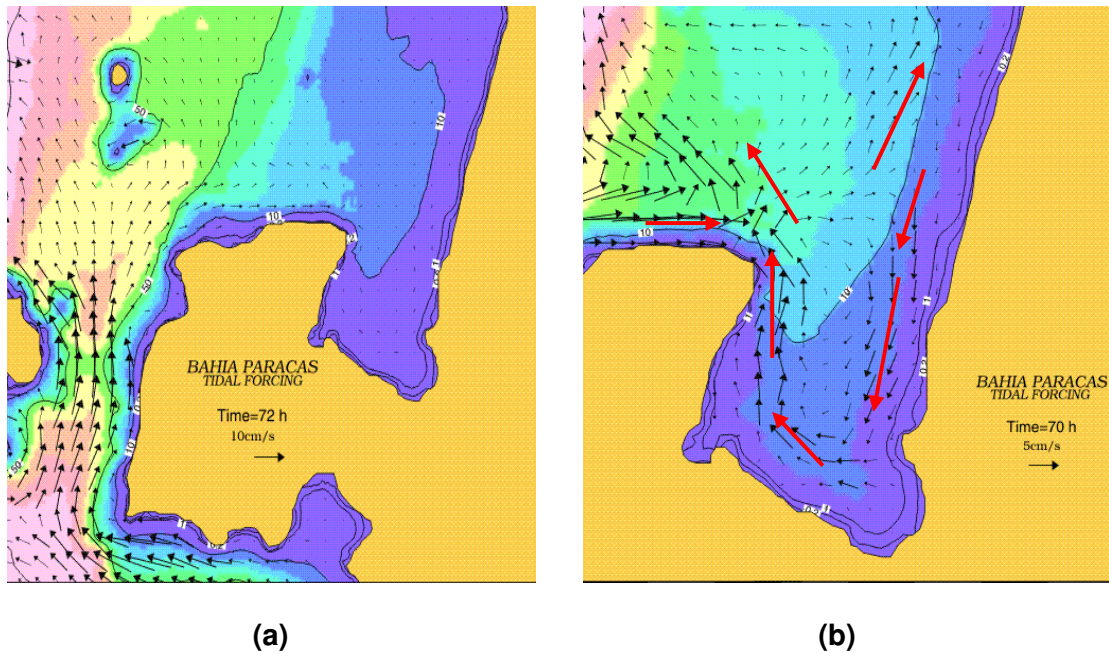


Figura. 4.70. Simulación numérica con forzante de viento. a) Todo el dominio. b) Simulación numérica haciendo un Zoom para la Bahía (Modelo Pom).

15-May-2005 09:00:00

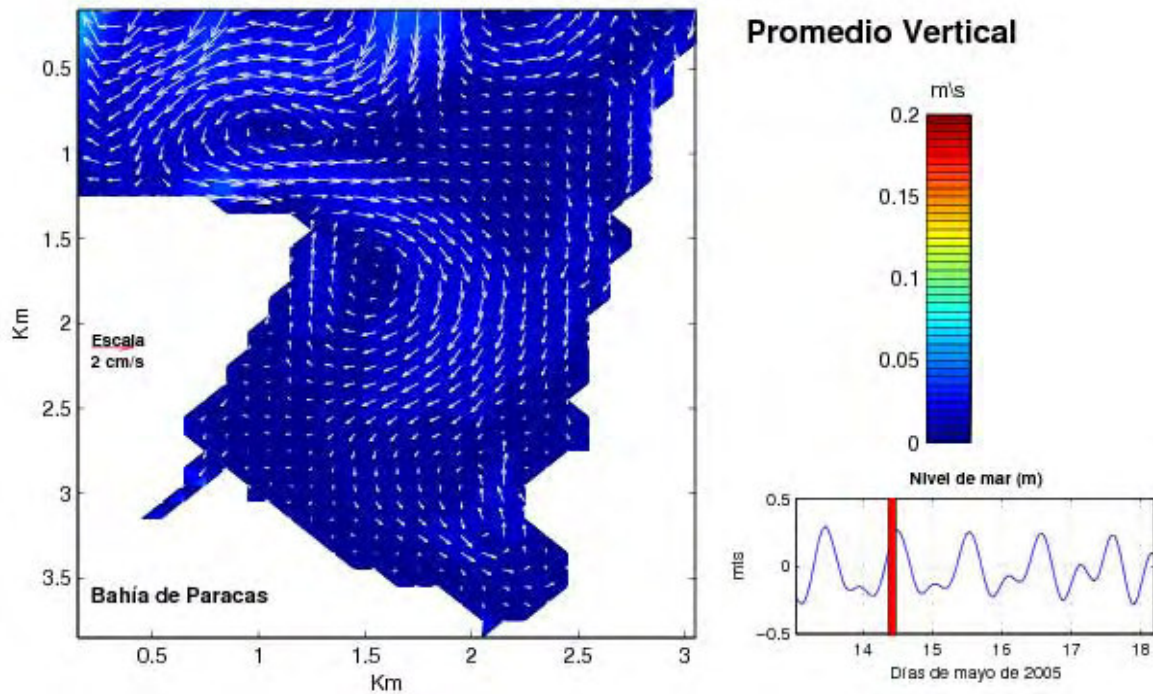


Figura. 4.71. Simulación numérica con forzante de viento y marea simultáneamente (Modelo Elcom).

## CAPITULO 5

### Conclusiones

---

En el presente trabajo se analizó la hidrodinámica en la Bahía de Paracas por medio de mediciones de campo y simulaciones numéricas. El análisis se realizó identificando los factores dominantes que actúan en el sistema y su variabilidad obtenida de las mediciones. Se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Las mediciones permitieron identificar que la hidrodinámica es determinada principalmente por el viento. Cuando hay periodos de calma el perfil de velocidades es uniforme y en una misma dirección. Pero cuando se presenta viento significativo, la estructura presenta capas superficiales desplazándose en la misma dirección y capas profundas con intensidad similar pero en dirección contraria. Con esta información se adaptó el modelo numérico que reproduce los efectos observados en las mediciones.
2. De los resultados de las mediciones, la Bahía presenta una estructura estratificada. Bajo estas condiciones el viento y la marea compiten por mezclar el sistema. El viento débil (menor que 4 cm/s) característico de esta época del año, mantiene una capa mezclada en la superficie y restringe la estratificación en el fondo.
3. La marea influye en el sistema sólo durante las pleamares y bajamares más intensos, promoviendo la estratificación del fondo a la superficie. Las corrientes durante esta época del año son del orden de 2 a 5 cm/s en la superficie y son influenciadas por el viento cuando éste predomina. En el fondo tienen velocidades de 2 a 3 cm/s y responden al flujo y reflujo de la marea.
4. El modelo permite tener variaciones temporales y espaciales de las variables seleccionadas para la simulación.

En general, los resultados de las mediciones muestran un sistema con mayor recirculación y corrientes débiles. Las corrientes superficiales generan el intercambio de agua con la Bahía en la boca, notándose que cuando la marea



entra a la Bahía las velocidades alcanzan su máximo en la parte media del pleamar y bajamar, cuando la pendiente de la onda de marea es máxima, mientras que en los valles o crestas de la onda de marea, las velocidades son mínimas; esto es controlado por los tiempos de residencia del flujo en el sistema.

La aplicación del modelo numérico en la Bahía de Paracas permite formular las siguientes conclusiones:

- Los resultados de las mediciones de campo realizadas muestran una estratificación importante, debida principalmente al gradiente de temperatura para los datos medidos y simulados.
- El modelo reproduce las características generales de la circulación y temperatura con los datos observados, mostrando una tendencia en la distribución de corrientes y temperatura en la Bahía de Paracas.
- Se ha simulado las secciones verticales de temperatura de las estaciones muestreadas, mostrando una estratificación en la vertical en la boca de conexión.
- Las simulaciones numéricas obtenidas con el modelo muestran una tendencia a generar efectos hidrodinámicos en la circulación en la Bahía de Paracas; esto se atribuye a la complejidad dinámica de esta zona.
- La circulación en la Bahía de Paracas no está influenciada por los gradientes de densidad, debido a que no fueron considerables durante la campaña de mediciones.
- Debido a la advección las temperaturas bajas entran por el fondo y lado Este e inundan la Bahía; sin embargo, en la superficie son demasiado estables.
- La fricción con el fondo modifica las velocidades; esto implica un sistema influenciado por efectos de la rotación terrestre.

## Referencias bibliográficas

Abbott, M. y Price, W. 1993. Coastal, Estuarial and Harbor Engineers' Reference Book. E and FN Spon, first edition.

Antenucci, J. y Imberger, J. 2000. On internal waves near the high frequency limit in an enclosed basin. *Journal of Geophysical Research (Oceans)* 106, 22465–22474.

Antenucci, J., Imberger, J. y Saggio, A. 2000. Seasonal evolution of the basin scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnology and Oceanography* 45, 1621–1638.

Arakawa, A. y Lamb, V. 1977. Computational design of the basic dynamic processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 173–263.

Balas, L. y Ozhan, E. 2002. Three-dimensional modelling of stratified coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 75–87.

Casulli, V. y Cattani, E. 1994. Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. *Computers Math. Applic.*, 27, 99–112.

Casulli, V. y Cheng, R. T. 1992. Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15, 629–648.

Casulli, V. y Stelling, G. 1998. Numerical simulations of 3d quasi-hydrostatic free-surface flows. *ASCE, J. Hydr. Eng* 124, 678–686.

Casulli, V. y Walters, R. 2000. An unstructured grid, three-dimensional model based on shallow water equations. *Inter. J. for Num. Methods in Fluids* 32, 331–348.

- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., y Brooks, N. 1979. Mixing in inland and coastal waters. Academic Press Inc.
- Flores, X., Ramírez, I., y Czitrom, S. 2005. Numerical simulation of the hydrodynamics of a port and effect of a wave-driven seawater pump. *Ciencias Marinas*, 31, 92–112.
- Fodzar, F., Parker, G. y Imberger, J. 1985. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics. *Journal of Physical Oceanography* 15 (11), 1557–1569.
- Geyer, W. R. y Smith, J. 1987. Shear instability in a highly stratified estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 17, 1668–1679.
- Hernández-Walls, R. 1986. Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de Licenciatura. UABC. Ensenada, B.C. 73 pp.
- Hodges, B. 2000. Numerical Techniques in CWR-ELCOM. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Hodges, B., Imberger, J., Saggio, A., y Winters, K. 2000. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*. (in press).
- Imberger, J. y Di Silvio, G. 1992. Mixing processes in a shallow lagoon. En 6<sup>th</sup> International Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas. Center for Water Research, ED763JI.
- Kolluru, V., Buchack, E., Edinger, J. E. y Brinkmann, P. 2001. Three dimensional thermal modeling of the gas-water outfall. In *Estuarine and Coastal Modeling* (ed. M. Spaulding), pp. 893–912.
- Kunze, E., Briscoe, M. G., y III, A. W. 1990. Interpreting shear and strain fine structure from a neutrally buoyant float. *Journal of Geophysical Research*, 95, 18,111–18,125.

- Kyeong, P. y Kuo, Y. A. 1996. Effect of variation in vertical mixing on residual circulation in narrow, weakly nonlinear estuaries. *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics*, 53, 301–317.
- Lagier, J., J.H., C., y C.D., B. 1996. Density structures in “low inflow estuaries”. *Coastal and Estuarine Studies.*, 53, 227–241.
- Lars, C., p., S., y C., C. 1996. Modes of stratification in a semi-enclosed bay at the north sea-baltic sea transition. *Estuarine and coastal shelf Science*, 42, 45–54.
- Laval, B. y Imberger, J. 2003. Mass transport between a semienclosed basin and the ocean: Maracaibo system. *JGR*, 108(C7), 3324–2244.
- Laval, B., Imberger, J. y Findikakis, A. 2001a. Dynamics of a large tropical lake. In preparation.
- Laval, B., Imberger, J. y Hodges, B. 2001b. Numerical diffusion in 3d, hydrostatic, z-level, lake models. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* .
- Leendertse, J., Alexander, R. y Liu, S. 1973. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: principles of computation. The RAND Corporation (California) Internal Rep.
- Leonard, B. 1991. The ultimate conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 88, 17–74.
- Mellor, G. L. y Yamada, T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791–1806.
- Mellor, G. L. y Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys*, 20, 851–875.
- Miles, J. 1961. On the stability of heterogeneous shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 20, 331–336.

- Morales Pérez, R. A. 2001. Simulation of dispersion by langmuir circulation. En International symposium on enviromental hydraulics, ISEH. Instituto Mexicano de tecnología del agua.
- Nepf, H. y Geyer, W. R. 1996. Intratidal variations in stratification and mixing in the Hudson estuary. *Journal of Geophysical Research*, 101, 12,079–12,086.
- Niller, P. y Kraus, E. 1977. Modeling and prediction of the upper layers of the ocean. Pergamon., paginas 143–172.
- Ramírez, I. 1999. Hydrodynamics of a Shallow Lagoon. Tesis de doctorado, Centre for Water Research. University of Western Australia.
- Ramirez, I. y Imberger, J. 2000. The simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon. in preparation.
- Ramírez, I. y Imberger, J. 2002. The numerical simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon, italy. *Applied Numerical Mathematics*, 40, 273–289.
- Ramírez, I., Quispe, J., 2005. Mediciones Oceanográficas en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú. Reporte Técnico. Comunicaciones Académicas, No 45284. Serie Oceanografía Física. CICESE. bp140505.
- Ranashinghe, R. y Pattiaratchi, C. 1998. Flusing characteristics of a seasonally-open tidal inlet: A numerical study. *Journal of Coastal Research.*, 4(14), 1405–1421.
- Schroeder, W. W., Dinnel, S., y Wiseman., W. 1990. Salinity structure of a shallow, tributary estuary. *Estuaries*, 36, 145–154.
- Sea-Bird 2002. SEASOFT-Win32: SBE Data Processing-Win32: CTD Data Processing and Plotting Software. Sea-Bird Electronics, Inc. Software Release 5.26 and later.
- Segovia, Z. y Rivera, D. 1988. Efectos de desechos orgánicos en las zonas adyacentes a los efluentes de Bahía de Todos Santos, México. *Ciencias Marinas*, 14, 101–116.



- Sharples, J., Moore, C. M., y Edward, R. A. 2001. Internal tide dissipation, mixing, and vertical nitrate flux at the shelf edge of ne new zeland. *Journal of Geophysical Research.*, 106, 14069–14081.
- Simpson, J. H. y Bowers, D. G. 1981. Models of stratification and frontal movements in shelf seas. *Deep Sea Research*, 28A, 7627–738.
- Simpson, J. H. y Hunter, J. R. 1974. Fronts in the Irish sea. *Nature*, 250, 404–406.
- Spiegel, R. H., Imberger, J., y Rayner, K.~N. 1986. Modelling the diurnal mixed layer. *Limnol. Oceanogr.*, 3, 533–556.
- Tartinville, B., Deleersnijder, E., y Rancher, J. 1996. The water residence time in the Mururoa Atoll Lagoon: sensitivity analysis of a three-dimensional model. *Coral Reefs*, 16, 193–203.
- Young, E., Brown, J., Horsburgh, K. y Fernand, L. 2001. Three-dimensional modelling of the summer circulation in the Celtic sea. In *Estuarine and Coastal Modeling* (ed. M. Spaulding), pp. 1–21.
- Yzocupe, V. A. 2001. 2D Hydrodynamic Modelling in Paracas Bay, Peru. M.Sc. Thesis H. H. 402, IHE-Delft, 74 pp.
- Yzocupe, V. A. 2005. Modelo de Dispersión de Contaminantes en Aguas Rasas. *Revista de Investigación de Física. SIN 1605-7744 Vol. 8 N0 1*, Lima, p. 46-53.
- Zakert, N., Imberger, J., y C., P. 2002. Numerical simulation of the coastal boundary layer of Perth, Western Australia. *Journal of coastal research.*, 18(3), 470–485.

## **Anexo 1**

### **Método numérico**

Las ecuaciones que gobiernan están individualizadas en una malla cartesiana; la solución se da en una formulación escalonada donde sólo las componentes de la velocidad se definen en cada cara y los escalares se definen en los centros de la celda. En la discretización de las ecuaciones, las caras de la celda son representadas por subíndices, por ejemplo  $i+1/2$ , mientras que los centros se representan con valores  $(i,j,k)$  de números enteros. La formulación de Casulli and Cheng(1992) se utiliza en la descripción. Para la forma discreta de las ecuaciones, se utiliza subíndices para representar la posición en espacio  $(i, j, k)$  discreto, dejando que  $U_{i,j,k}^{n+1}$  represente el vector de la columna del agua para los valores  $n+1$  de la velocidad en el tiempo en la posición  $(i, j, k)$ , que existe en el espacio  $n+1$  de la solución del tiempo para todo  $k$  que satisfaga la ecuación, donde  $b_{i,j}$  satisface la relación  $b_{i,j} \leq \sum_{m=1}^{k_{\max}} \Delta z_{i,j,m}^n \leq n_{i,j}$ , altura del fondo del dominio en el punto  $(i,j)$ ;  $n_{i,j}$  es la altura de la superficie libre y  $k_{\max}$  es el número máximo de las celdas de la malla en la dirección vertical.

### **Formulación Semi-implícita para el la Ecuación del Momentum**

La evolución semi-implícita fundamental del campo de velocidad se puede individualizar en  $\eta^*$  donde el espacio de solución es de manera similar al acercamiento del TRIM como:

$$U_{i+1/2,j}^{n+1} = A_{i+1/2,j}^n G_{i+1/2,j}^n - g \frac{\delta t}{\delta x} \left[ \theta_1 (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) + (1-\theta_1) (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) \right]$$
$$V_{i,j+1/2}^{n+1} = A_{i,j+1/2}^n G_{i,j+1/2}^n - g \frac{\delta t}{\delta y} \left[ \theta_1 (\eta_{i,j+1}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) + (1-\theta_1) (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) \right]$$

donde  $G$  es un vector explícito del término de la fuente,  $\theta_1$  representa el termino "implícito" de la superficie libre (la opción generalizada de lo implícito para  $0.5 < \theta_1 < 1.0$  en la versión de ELCOM 2). El esquema semi-implícito del modelo, es una discretización de backwards-Euler (es decir  $\theta_1 = 1$ ) de la evolución superficial libre que es formalmente de 1er orden y exacta en tiempo.

(Casulli and Cattani, 1994) usa el método de Euler para la solución de las ecuaciones hidrostáticas de momentum; se puede ampliar al esquema de dos niveles que es formalmente de segundo-orden (para  $\theta_1 = 1$ ). Sin embargo, la malla gruesa de la simulación aumenta en exactitud numérica y da lugar a un aumento en la habilidad del modelo. En la solución hidrostática las ondas dispersivas causan forzamiento local a través de la columna del agua y son perjudiciales a la habilidad de la solución. En general, un sistema fuertemente forzado se modela mejor con el esquema de Euler pues la energía de la onda más allá de dos o tres períodos es a menudo inaplicable a la física en primer orden. Usando cualquier discretización implícita de dos niveles (Casulli y Cheng, 1992), o cualquier técnica explícita de discretización, la matriz de  $A$  se puede representar como:

$$A = \begin{bmatrix} b_n + \gamma_k & c_n & 0 & 0 & 0 \\ a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & a_2 & b_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_1 & b_1 + \gamma_1 \end{bmatrix}$$

Los términos de la matriz  $A$  son fijados por condiciones de límite, mientras que  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los términos:

$$b_k = -a_k + \Delta z_k - c_k$$

$$b_k = -\theta_2 \frac{v_3 \Delta t}{\Delta z} \Big|_{k+1/2}$$

$\theta_2$  es el coeficiente que es determinado por las técnicas numéricas de la discretización. Para  $\theta_2=1$  el término viscoso vertical  $c_k = -\theta_2 \frac{v_3}{\Delta z} \bigg|_{k+1/2}$  está individualizado usando al revés una técnica de Euler. para el modelo de la capa de mezcla usado en el modelo  $\theta_2=0$  y la discretización es explícito con  $A$  igual a cero para todos los términos de la diagonal principal.

Los términos de la fuente  $G$  en las ecuaciones se pueden representar como:

$$G_{i+1,j/2} = L(U_{i+1,j/2}) - \Delta t \left\{ B_{i+1,j/2}^n + D_x(U)_{i+1,j/2} + D_y(U)_{i+1,j/2} - fV_{i+1,j/2} \right\}$$

$$G_{i,j+1/2} = L(V_{i,j+1/2}) - \Delta t \left\{ B_{i,j+1/2}^n + D_x(V)_{i,j+1/2} + D_y(V)_{i,j+1/2} - fU_{i,j+1/2} \right\}$$

El operador representa la discretización advectiva,  $B( )$  representa la discretización baroclinica,  $D( )$  representa la discretización turbulenta horizontal

de la difusión. El modelo calcula la difusión vertical usando un modelo de mezcla vertical. La mezcla se representa como operador que se describe como  $M( )$  de  $U_{i,j,k} = M(U_{i,j,k}^n)$ .

## Anexo2

### Condiciones Iniciales y de Frontera

Para la resolución del sistema de ecuaciones es necesaria la especificación de las condiciones iniciales y de frontera. Además, va a ser a través de estas condiciones de donde va a proceder el forzamiento del sistema en la mayoría de los casos. Una vez introducida una pequeña especificación de las condiciones iniciales, se introducen las parametrizaciones de los intercambios de momentum, salinidad y temperatura en la superficie y en el fondo, para luego tratar los límites geográficos del medio marino.

El hecho de que el sistema tenga una limitación de espacio da lugar al uso de las fronteras abiertas, en las distintas condiciones usadas para dar cuenta de esta frontera y en especial, debido a su complejidad, en la implementación del modelo.

#### 1. Condiciones iniciales

La condición inicial del momentum suele considerarse nula, con la elevación inicial constante para todo el dominio. Esta condición inicial, al ser irreal, hace conveniente que al comienzo de una simulación, el modelo pase un cierto tiempo de relajación, denominado *spin up*, durante el cual la velocidad y la elevación adquieren un régimen normal. En este tiempo de transición, el paso temporal será menor y la viscosidad turbulenta mayor que los valores que se pretenden utilizar para estas dos variables, con la intención de destruir los gradientes que pudiesen surgir al comienzo de la simulación y prevenir la inestabilidad del sistema. Estos parámetros se irán adecuando progresivamente a su valor deseado. El tiempo de transición depende del fenómeno a estudiar, siendo del orden de 1 o 2 días para la simulación.

Los campos de salinidad y temperatura iniciales suelen crearse a partir de datos de mediciones de campo. Debido a que todos los nodos de la malla necesitan



un valor inicial, estos suelen ser hallados a través de la interpolación de los datos medidos, lo que da campos de temperatura y salinidad.

Una forma simple de iniciar consiste en utilizar una interpolación bilineal en horizontal y un período de *spin up* lo suficientemente largo para destruir los gradientes irrealistas que surgen de esta interpolación. Nuevos tipos de interpolaciones más complejas reducen la inconsistencia de estas condiciones iniciales. Otra forma de inicialización consiste en considerar que el término de forzamiento baroclínico es nulo al principio y va aumentando su forzamiento progresivamente hasta su valor verdadero.

## **2. Condiciones en la superficie**

Para expresar el hecho de la inexistencia de un flujo de agua de mar a través de la superficie se usa como condición en esta frontera la denominada condición cinemática. Ésta implícitamente incluida en las ecuaciones al ser utilizada en la deducción de la ecuación de la superficie libre. A parte de esta, las condiciones de contorno en la superficie corresponden a los intercambios de momento, calor y masa existentes entre la superficie libre del mar y la atmósfera.

En el caso del momentum, el flujo de éste es debido principalmente al arrastre de la superficie marina por el viento. Este flujo es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del viento a una altura dada que se toma como referencia, la cual suele ser 10 m.

Para la especificación de los flujos de calor y masa en la superficie se utilizan dos tipos de metodología diferente o una combinación de ambas. El primero consiste en el cálculo directo de estos flujos, teniendo en cuenta los fenómenos que contribuyen a la transferencia de estas cantidades en la interfase atmósfera-océano.

Otra forma de especificar estas transferencias es mediante la técnica de relajación a valores climatológicos conocidos. Esta técnica permite solventar las

dificultades provenientes de la falta de precisión en los valores que son necesarios suministrar a las ecuaciones.

### **3. Condiciones en el fondo**

En el fondo sólo se tiene en cuenta el flujo de momentum, considerando nulos los flujos de calor y masa, lo que significa para la primera variable que el mar está en equilibrio térmico con el fondo y para la segunda es equivalente a una condición de impenetrabilidad. Para la componente normal del momentum, también se considera una condición de impenetrabilidad de flujo.

En el caso de la componente tangencial de la velocidad, la capa límite no puede ser resuelta numéricamente sin utilizar un número elevadamente prohibitivo de niveles de cálculo cerca del fondo. Se supone, por tanto, una condición de rozamiento de flujo turbulento similar a la de la superficie libre.

### **4. Fronteras cerradas**

Se supone que el flujo del agua no puede penetrar en las paredes laterales sólidas, por lo que éstas se van a considerar fronteras cerradas, con condiciones semejantes al fondo. Por tanto, la velocidad normal a las paredes será nula. La velocidad tangencial debería de considerarse también nula para cumplir la condición de no deslizamiento, pero debido a que el paso espacial horizontal es excesivamente grande para resolver la capa límite, se sustituye esta condición por un flujo difusivo que, en particular, se puede aproximar a cero.

### **5 Fronteras móviles**

Estas fronteras se utilizan para representar la situación que ocurre cuando la marea cubre y descubre ciertas zonas del área a modelar, como por ejemplo en los bancos de arena, lo cual hace que la frontera lateral del agua se desplace. La localización de esta frontera viene dada por la imposición de la profundidad total nula, una vez que se considera la profundidad negativa. Por razones

computacionales, esta condición no puede ser usada para decidir si la celda esta descubierta o no.

Para la salinidad y la temperatura también se considera una profundidad mínima a partir de la cual se calculan sus valores, permaneciendo constantes. La elección adecuada de las profundidades hace que sean atenuadas las perturbaciones numéricas introducidas con estas fronteras móviles, causadas por la variación discontinua de las velocidades (Leendertsee, 1970; Stelling, 1983).

## **6. Fronteras abiertas**

Normalmente se ha entendido como fronteras abiertas a aquellas fronteras artificiales que dejan salir con la mínima reflexión las ondas generadas dentro del dominio de cálculo (Røed & Cooper, 1986). Por claridad, en este trabajo se denominará frontera abierta a cualquier frontera artificial que surge de la limitación del área que se quiere estudiar, o sea, aquella que separa el medio marino que es modelado con el que queda fuera del modelo. Estas fronteras son las más problemáticas a la hora del modelado, debido al hecho de ser artificiales y a que deben de permitir que la onda se propague a través de la frontera y el fluido pase libremente por ésta. En la actualidad, el problema de las fronteras abiertas no ha sido resuelto todavía, esto es, no existe una sola forma de implementar la frontera abierta que sea válida para cualquier tipo de aplicación.

Las condiciones de Dirichlet y Neumann no son más que casos concretos de las fórmulas de extrapolación, obteniéndose los valores de la frontera a partir de la variable dependiente en el primer caso o de su derivada en el segundo.

Condición de radiación: El valor es obtenido en la frontera a partir de la distribución en el dominio y su velocidad de propagación. La expresión original de esta condición fue aplicada por Sommerfeld a la ecuación de Helmholtz.

Normalmente se usa la velocidad de fase en la vecindad del dominio próximo a la frontera (Orlanski, 1976), extrapolando su valor a ésta, o una velocidad de

fase consistente en el paso espacial de la malla dividida por el paso temporal usado (Camerlengo & O'Brien, 1980).

La condición de tipo esponja: Consiste en extender el dominio de estudio a un área adicional que posea altos índices de disipación con la intención de amortiguar las perturbaciones que se dirigen al exterior e impedir que se reflejen en la frontera (Israeli & Orszag, 1981). Normalmente se utiliza combinada con otro tipo de fronteras tipo Dirichlet o Neumann. Sus dos desventajas principales son la necesidad de aumentar el dominio de estudio y por tanto el tiempo de cálculo y el hecho de que el amortiguamiento es experimentado por cualquier tipo de onda y no sólo de aquellas que se dirigen al exterior del dominio.

La condición basada en el método de las características: Se basa en la integración de las ecuaciones características y no de las ecuaciones primitivas. Pruebas de este método con modelos lineales bidimensionales muestran el buen comportamiento de este tipo de solución (Røed & Cooper, 1987), pero es de difícil aplicación a ecuaciones tridimensionales.

La condición extrapolada de un modelo general o condición tipo submodelo: Aunque no es en realidad un nuevo tipo de condición de frontera, este tiene características específicas que la diferencian de la condición de extrapolación. Consiste en la utilización de un modelo de malla más gruesa y área más grande donde esté incluido el dominio de interés. Las condiciones de frontera son extrapoladas de los resultados del modelo en el dominio grande. Existen dos tipos de submodelos: unidireccionales o pasivos, donde la información sólo fluye del dominio grande al pequeño, y bidireccionales o activos, donde la información fluye en los dos sentidos

## **6.1. Condición de Dirichlet**

La condición de Dirichlet consiste en la imposición de la variable a calcular en la frontera, sin tener en consideración la velocidad de propagación de la variable.

La condición de Dirichlet posee un elevado coeficiente de reflexión, por lo que sólo se aconseja su utilización cuando la frontera está lo suficientemente alejada de la zona del dominio que se quiere estudiar, el rozamiento con el fondo es grande y la duración de la simulación es pequeña. La simplicidad de la condición de Dirichlet hace, sin embargo, que sea muy utilizada en ciertas situaciones donde una variable es conocida en la frontera. Este es el caso, por ejemplo, del forzamiento del modelo por causa de la marea. Normalmente es conocida la elevación de la marea en la frontera a lo largo del tiempo a partir de los datos experimentales. Estos datos recogen tanto las ondas incidentes como las reflejadas en el interior del dominio, por lo que el valor que se impone en la frontera es exacto.

Otras veces, el valor conocido no corresponde a la elevación de la marea sino al caudal que atraviesa esa frontera. Este es el caso de la simulación de aportes fluviales al dominio, donde el dato de entrada es el propio caudal.

## **6.2 Condición de Neumann**

La condición de Neumann consiste en la imposición en la frontera del valor de la derivada espacial de la variable dependiente. Como la condición de Dirichlet no tiene en cuenta la velocidad de propagación de la perturbación, se suele imponer el flujo nulo de la variable a través de la frontera. Esta condición posee un coeficiente de reflexión menor que el de la condición de Dirichlet, pero aún así debe ser utilizado en fronteras lo suficientemente alejadas del dominio y en periodos de simulación pequeños.

## **6.3 Condición de radiación**

Los modelos lo utilizan como una condición de radiación forzada (Santos & Neves, 1991) con la que se pretende.

1. Dejar salir las perturbaciones generadas en el dominio tal como lo debe hacer una frontera artificial abierta.
2. Imponer valores conocidos de la elevación en la frontera.



3. Permitir simular los caudales reales que atraviesan la frontera artificial cuando se tiene en cuenta la acción forzada del viento. Por tanto, la condición implementada va a ser una condición de radiación con ondas forzadas, que además va a estar preparada para asumir una incidencia no ortogonal de las ondas con la frontera.